

## TÍTOL / TÍTULO

**MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DEL VALLE DE ARÁN  
EN TÉRMINOS DE LA FRECUENCIA FUNDAMENTAL.  
MÉTODO DEL COCIENTE ESPECTRAL H/V**

## AUTOR

**Carolina Meneses Méndez**

## TUTOR

**Luis G. Pujades Beneit, Albert Macau y Sara Figueras.**

## ESPECIALITAT / ESPECIALIDAD

**Ingeniería Sísmica**

## DATA / FECHA

**Barcelona, Julio 2010**







E.T.S.E.C.C.P.B.

Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartografía y Geofísica

**MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DEL VALLE DE ARÁN  
EN TÉRMINOS DE LA FRECUENCIA FUNDAMENTAL.  
MÉTODO DEL COCIENTE ESPECTRAL H/V**

por  
Carolina Meneses Méndez

Directores:  
Albert Macau  
Sara Figueras

Tutor:  
Luis Pujades

Universidad Politécnica de Cataluña  
Barcelona, Julio 2010







A mis padres  
Fernando y Helena



## **Agradecimientos**

El presente trabajo fue llevado a cabo en el Instituto Geológico de Cataluña, forma parte del Proyecto SISPYR y corresponde al trabajo final del máster en Ingeniería del Terreno e Ingeniería Sísmica que he llevado a cabo en la Universidad Politécnica de Cataluña.

Muchos nombres pasan por mi cabeza cuando pienso en la palabra “agradecimiento”. Quiero comenzar agradeciendo a mi tutor, el profesor Luis Pujades, una extraordinaria persona que me ha guiado no solo durante la realización de la tesis sino a lo largo de todo el máster. Gracias profesor, en mí tiene a una persona que lo aprecia mucho! También quiero agradecerle a mis directores de tesis: Sara y Albert, quiero que sepan que cuando me pregunten por mis directores de tesis responderé que tuve la dicha de contar con los mejores! A Fabian, siempre dispuesto a ayudarme, siempre atento, para mí esta tesis tiene tres directores, tres angelitos que me guiaron, ayudaron y apoyaron en todo momento y con los que aprendí un sin fin de cosas. Son un excelente equipo de trabajo, para mí ha sido un verdadero privilegio haber tenido la oportunidad de aprender junto a ustedes. A Victor, mi vecino de puesto de trabajo, con quien conversaba en momentos donde necesitaba despejarme. Le deseo todo el éxito del mundo en la culminación de su doctorado! Quiero que sepan que todos ustedes tienen una personita más con quien contar del otro lado del Atlántico. Son todos extraordinarios y les deseo toda la dicha que puedan recibir! Quiero agradecerle a Jonas, quien también realizó aportes a mi trabajo, muchas gracias y mucho éxito en la culminación de tu carrera! A Bea y Anna les deseo mucho éxito con sus bebés. A Pedro, que vez en cuando entraba con algún chiste o comentario simpático. A Xavier, quien cada vez que pasaba por el departamento mostraba interés en la evolución del trabajo. A los vigilantes del instituto, personitas que cuidaban el instituto mientras trabaja, incluso hasta altas horas de la noche.

A las personas que de una forma u otra han formado parte de mi estadía en Barcelona, gracias! A Felipe, mi mejor amigo colombiano y con quien compartía momentos de relax mientras nos tomábamos un cafecito o un te en la uni, muchas gracias, sabes que te aprecio un montón y que cuentas con una gran amiga en Venezuela. A Yessenia y Vladimir, siempre atentos y buscando ocasiones para reunirnos. A Marina y todos mis compañeros con lo que compartí largas horas de estudio a lo largo del máster. A Gemmita, compañía inseparable durante mi primer



año de máster y a Dani, siempre fantasma, pero sin dejar de ser una grata compañía.

La lista de personas que se encuentran en Venezuela y a las que me gustaría agradecerles tanto apoyo, compañía, ayuda prestada, consejos dados es infinita! No puedo mencionarlos uno por uno porque me extendería más de lo permitido, pero a todos, GRACIAS! Gracias a los que vinieron, a los que me acompañaron siempre a distancia, a los que se fueron y regresaron, a lo que me hicieron reír, a los que me hicieron llorar, todos son parte de mi vida y me siento privilegiada por eso. A mis amiguitos que dejo por este lado del Atlántico: Davidcito, mucho éxito, siempre cuentas conmigo, Herman, sabes que sobran las palabras, tu simplemente eres más! me harás falta en Caracas! Se me cuidan chicos, y no se olviden de los que estamos del otro lado. Maru, éxito en el doctorado que comenzarás, cuídate mucho también. A mis amigos que ya no están en Venezuela y me harán una falta increíble a mi regreso, espero poder visitarlos pronto.

A Francesca, mi hermana, amiga, confidente, apoyo, compañía... siempre le agradeceré a la vida el haberte conocido. Quiero que sepas que me regreso a casa, pero no te vas a deshacer de mí! Vendré a fastidiarte cada vez que sea posible, y si te mudas de Barcelona, pues no importa, te buscare a donde vayas. Gracias por todo Fran. Sabes que aquí estaré para lo que necesites! Te quiero mucho y se que la vida te tiene reservada un sin fin de cosas hermosas! Al igual que a tu mami... ambas son personas súper especiales que se merecen lo mejor de lo mejor y se que eso recibirán!

Por último y para nada menos importante, a mi familia. A mis abuelos, tíos, primos. Todos juntos forman la familia mas fenomenal del mundo! Gracias por el apoyo y el cariño. A mi hermana y mi cuñado, gracias por tanto apoyo, por estar siempre pendientes de mí, por ayudarme, escucharme, orientarme, pero sobre todo, gracias por Paola! A mi mami y mi papi. Ustedes son lo mas grande que tengo, son mi ejemplo, mi modelo, mi norte. Los amo y no me alcanzara una vida para agradecerles todo lo que son y lo que me han dado.

Espero no se me este pasando nadie. De corazón, gracias s TODOS por TODO... y gracias a dios y a la vida por ponerlos a todos en mi camino!!!

...y gracias a este trabajo por haberme dado la oportunidad de conocer un lugar tan mágico como lo es el Valle de Arán!

Todos ustedes estarán por siempre y para siempre en mis recuerdos!





## Indice

CAPÍTULO 1. INTRODUCCION.....	1
1.1 Objetivos.....	6
1.2 Contenido.....	6
1.3 Proyecto SISPYR.....	8
CAPÍTULO 2 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA EN ESTUDIO.....	13
2.1 Ubicación geográfica.....	15
2.2 Descripción geológica.....	16
2.2.1 Geología estructural.....	16
2.2.2 Descripción litológica.....	18
2.3 Descripción topográfica.....	19
CAPÍTULO 3 MÉTODO DEL COCIENTE ESPECTRAL H/V.....	21
3.1 Marco teórico. Desarrollo y evolución del método.....	23
3.2 Aplicaciones recientes realizadas por el IGC.....	30
3.2.1. Microzonación sísmica. Contribución a los estudios de peligrosidad sísmica a escala local en zonas rurales y urbanas. ....	30
3.2.2 Aplicación de H/V en la Bahía de Cádiz.....	36
3.2.3 Ambient vibrations measurements in Barcelona for soil Characterization .....	39
CAPÍTULO 4 CAMPAÑA DE CAMPO. MEDICIÓN DE RUIDO SÍSMICO.....	43
4.1 Mediciones de ruido sísmico para la aplicación del método de H/V en el Valle de Arán.....	45
4.2 Medición de ruido sísmico en las localidades seleccionadas.....	49
4.2.1 Población de Les.....	49
4.2.2 Población de Bossòst.....	51
4.2.3 Población de Vielha.....	52
4.2.4 Población de Arties.....	53
CAPÍTULO 5 PROCESADO. DETERMINACIÓN DE LA FRECUENCIA FUNDAMENTAL DEL SUELO.....	55
5.1 Procesado de las medias de ruido sísmico.....	57
5.2 Análisis y discusión de los resultados.....	62
5.2.1 Población de Les.....	62
5.2.2 Población de Bossòst.....	68
5.2.3 Población de Vielha.....	74
5.2.4 Población de Arties.....	90
CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	95
6.1 Conclusiones.....	97
6.1.1. Población de Les.....	97
6.1.2. Población de Bossòst.....	98
6.1.3. Población de Vileha.....	98
6.1.4. Población de Arties.....	99
6.2 Recomendaciones.....	100

CAPÍTULO 7 BIBLIOGRAFÍA.....	101
APÉNDICE 1. Parámetros aplicados a cada registro durante su procesado.....	109
APÉNDICE 2. Gráficas de cociente espectral H/V en función de la frecuencia.....	115

---

## **CAPÍTULO 1**

### **INTRODUCCIÓN**

---



Los daños causados por recientes terremotos en ciudades como Ciudad de México (Michoacán, 1985) y la Bahía de San Francisco (Loma Prieta, 1989), han llevado a la conclusión de que estos son consecuencia directa de las condiciones geológicas locales de cada zona ya que afectan considerablemente a la propagación de las ondas sísmicas en el subsuelo.

Hay dos factores que influyen de manera considerable en el efecto de sitio: los efectos superficiales del suelo y los efectos topográficos. Según Franklin et al. (2006), los efectos topográficos son amplificaciones o atenuaciones que localmente se perciben debidas a la resonancia de las ondas debido a la topografía del lugar. Por otro lado, en su trabajo Franklin et al. (2006) también indican que se conoce como efecto superficial de suelo al aumento local de la vibración debida a la resonancia de los suelos situados encima del basamento rocoso. Esto se produce cuando las ondas sísmicas entran en una cuenca sedimentaria cuyo terreno presenta un contraste de impedancia sísmica importante respecto al basamento rocoso. La impedancia sísmica está definida por el producto entre la velocidad de propagación de las ondas de cizalla ( $V_s$ ) en el terreno y la densidad del mismo ( $\rho$ ). Al quedar las ondas sísmicas atrapadas en la cuenca sedimentaria, estas presentan una fuerte amplificación de la frecuencia propia de la cuenca, que se define como frecuencia fundamental. La frecuencia fundamental se puede calcular a través de la velocidad de propagación de las ondas de cizalla y de las dimensiones de la cuenca, así como por su estratigrafía. El hecho de que sólo unos rangos de frecuencia queden amplificados hace importante poderlos determinar, ya que aquellas estructuras acopladas a estas frecuencias se verán especialmente afectadas por dicho efecto (Franklin et al. 2006).

Giraldo et al. (1999) y Moreno y Alfaro (2000) entre otros, presentan como ejemplo más significativo del efecto de sitio los daños sufridos en Ciudad de México durante el terremoto de Michoacán 1985. En este terremoto las amplificaciones del orden de cincuenta veces en el rango frecuencial en torno a 0,5 Hz afectaron casi exclusivamente a los edificios de hormigón reforzado de entre 10 y 14 niveles de altura. Es justo a partir de este terremoto que el estudio de la amplificación del suelo comenzó a ocupar gran importancia.



Se han planteado diferentes técnicas para lograr la determinación de los efectos superficiales del suelo, unas con enfoques numérico-teóricos y otras con enfoques más experimentales. Los enfoques teóricos requieren de un amplio conocimiento de las características del subsuelo, lo que hace que su aplicación sea muy costosa y poco práctica, quedando principalmente para uso científico.

Con respecto a los enfoques experimentales, Figueras (1994), Alfaro et al. (2001), Franklin et al. (2006) y Macau (2008), sugieren que existen dos líneas principales de trabajo: los basados en la medición del efecto de sitio durante terremotos y los basados en la medición del ruido ambiental. La primera línea, basada en el estudio de terremotos, tiene como gran limitante que, para poder llevar a cabo dichas mediciones, es necesario contar con diversos sensores que tienen que instalarse de manera permanente en el área en estudio, quedando a la espera de la ocurrencia de un evento sísmico. Aunado a esto, cuando los eventos sísmicos registrados son de débil amplitud, los resultados obtenidos han de extrapolarse a terremotos de gran magnitud, con el posible error que se comete al no conocerse con precisión los posibles efectos no lineales del suelo (Franklin et al. 2006). También hay que tomar en cuenta que, en zonas de moderada actividad sísmica, hay que esperar mucho tiempo para poder disponer de algún registro sísmico. En cambio, en trabajos basados en mediciones de ruido ambiental se pueden utilizar diferentes sensores ubicados de forma provisional en el área en estudio, realizándose mediciones en períodos de tiempo relativamente cortos, permitiendo de esta forma poder tener mayor volumen de datos y cubrir áreas de terreno más extensas en espacios de tiempo mucho más reducidos. Es por ello que el estudio del ruido sísmico es una herramienta muy conveniente para estimar el efecto que la geología superficial puede tener sobre la propagación de las ondas sísmicas en el terreno.

Los trabajos basados en la medida del ruido ambiental empezaron a popularizarse a partir del trabajo de Nakamura (1989), que consiste en realizar la relación espectral entre las componente horizontales y la vertical de medidas de ruido sísmico. Dicha técnica se desarrolló a través de investigaciones de pozos junto al análisis de registros de movimientos fuertes del suelo en diferentes áreas y con variadas condiciones geológicas. A pesar de que ha sido bastante controvertida debido a la presencia de vacíos teóricos (Sheila, 2006), la técnica del cociente

espectral H/V se ha impuesto debido a su bajo coste y la relativa facilidad de realización.

La técnica es efectiva para definir la frecuencia fundamental de una capa de sedimentos, tal y como ha sido demostrado en numerosos estudios, siendo uno de estos el realizado por Nogoshi e Igarashi (1971) donde comparan la relación H/V de las ondas Rayleigh con microtemores y concluyen que, en su mayoría, los microtemores se encuentran compuestos por ondas Rayleigh y, de acuerdo a lo sugerido por diversas investigaciones teóricas, el pico observado en la relación puede ser asociado con el modo fundamental de las ondas Rayleigh.

Normalmente los resultados se muestran en forma de mapas de períodos predominantes que se definen como el valor para el cual el cociente espectral H/V es máximo. Esta forma de presentar los resultados es muy compacta y útil, ya que en la mayoría de las cuencas sedimentarias se presenta un pico en el cociente espectral.

El presente trabajo forma parte del proyecto SISPYR, contribuyendo con la acción 4, la cual contempla la evaluación del riesgo sísmico. Para ello se hace necesario generar un mapa de peligrosidad sísmica a escala local de las poblaciones incluidas dentro del proyecto. El Valle de Arán es una de las regiones dentro del territorio español que ha sido seleccionada como zona piloto y será la región a ser estudiada durante el desarrollo de este trabajo.

### **1.1. Objetivos**

El presente trabajo tiene como objetivo principal realizar la microzonificación sísmica del Valle de Arán basada en la frecuencia fundamental que caracteriza al suelo de la región, aplicando para ello el método del cociente espectral H/V. Para lograr este objetivo, se han llevado a cabo los siguientes puntos:

- Visita a la zona en estudio para un reconocimiento previo a la campaña de medición de ruido sísmico con el fin de determinar los emplazamientos más aptos para la realización de dichas medidas.
- Realizar la campaña de campo de medidas de ruido sísmico en los emplazamientos previamente determinados.
- Procesado de las señales registradas durante la campaña de campo.
- Generar la gráfica correspondiente a cada emplazamiento donde se represente la variación de la relación del cociente espectral H/V en función a la frecuencia.
- Determinar el valor de frecuencia fundamental del suelo en cada uno de los emplazamientos estudiados.

### **1.2. Contenido**

Para poder alcanzar los objetivos antes planteados, el trabajo ha sido dividido en 7 capítulos, cuya estructuración se explica a continuación:

Capítulo 1: Introducción.

Capítulo 2: Descripción de la zona en estudio.

Capítulo 3: Método del cociente espectral H/V.

Capítulo 4: Campaña de Campo. Medición del ruido sísmico.

Capítulo 5: Determinación de la frecuencia fundamental del suelo del Valle de Arán.

Capítulo 6: Conclusiones y recomendaciones.

Con el primer capítulo se pretende introducir la memoria haciendo una breve reseña sobre la importancia y utilidad que el método del cociente espectral H/V lleva consigo y como este será aplicado para poder alcanzar los objetivos planteados. También se expone y describe el proyecto dentro del cual se desarrolla el trabajo y se explican sus respectivas acciones, indicándose que este estudio se desenvuelve

dentro de la acción 4 del proyecto SISPYR y que como aporte para la misma se busca generar el mapa de frecuencia fundamental de la región del Valle de Arán, la cual ha sido seleccionada como una de las zonas piloto para realizar la microzonificación sísmica de los Pirineos.

Todo lo referente a la ubicación geográfica del área en estudio, su descripción geológica tanto a nivel litológico como estructural, características topográficas y de relieve se encuentra expuesto en el segundo capítulo. En este capítulo también se presentan los mapas correspondientes a cada una de las descripciones mencionadas anteriormente, ello con el fin de poder presentar de forma gráfica dichas características y así poder tener una noción más clara de las mismas.

En el tercer capítulo se explica la teoría del método del cociente espectral H/V. Se exponen sus fundamentos y la visión que diversos autores tienen respecto al mismo. Se hace una reseña sobre su evolución y los estudios que recientemente se han ido realizando. También se indican las ventajas y limitaciones que posee el método. Una vez expuesta la teoría del método del cociente espectral H/V, se hace referencia a dos estudios realizados por el Instituto Geológico de Cataluña y que se basaron en la aplicación del método H/V. El primero se llevó a cabo en la Bahía de Cádiz donde el método H/V fue utilizado conjuntamente con el de arrays, todo ello con el fin de poder determinar los efectos de sitio característicos de la Bahía de Cádiz. Luego se realizaron medidas del ruido sísmico en el principado de Andorra, el valle de la Cerdaña y la ciudad de Málaga, todo con el fin de contribuir a los estudios de peligrosidad sísmica a escala local en dichas zonas. Por último, se hace mención del estudio referente a los efectos de sitio que puede sufrir la ciudad de Barcelona a la hora de la ocurrencia de un evento sísmico y que, junto a un estudio de vulnerabilidad sísmica ayudarían a determinar las áreas que pueden presentar un riesgo sísmico más elevado.

En el capítulo 4, denominado Campaña de Campo, se describe todo lo referente al proceso de medición de ruido sísmico en el área en estudio. El capítulo comienza haciendo mención a la visita de reconocimiento que se realizó en la región del Valle de Arán con el fin de determinar los emplazamientos más idóneos para la medición de ruido sísmico. Luego se describe todo lo referente a la campaña de

campo: número de emplazamientos estudiados, parámetros utilizados para medición de ruido sísmico, entre otros. Por último se muestra el mapa correspondiente a cada uno de los cuatro municipios del Valle de Arán que fueron estudiados. En dichos mapas se representa la ubicación y distribución de los emplazamientos estudiados en cada una de las poblaciones.

Capítulo 5 se centra en la determinación de la frecuencia fundamental del suelo a partir de mediciones de ruido sísmico empleando el método del cociente espectral H/V. Para ello, primero se realizó el procesado de las medidas de ruido sísmico realizadas en el área en estudio. Para la determinación de la relación del cociente espectral de los espectros de Fourier de las componentes horizontales y vertical del ruido sísmico se utilizó como herramienta el software GEOPSY. Una vez determinados los valores de frecuencia fundamental del suelo para cada uno de los emplazamientos estudiados, se generaron mapas y perfiles a partir de los cuales se realizó la discusión de los resultados.

Como parte final de la memoria, se exponen las conclusiones obtenidas a lo largo del estudio para cada una de las poblaciones estudiadas en el Valle de Arán. También se proponen estudios futuros que puedan contribuir y aportar información a los resultados obtenidos durante la realización del presente trabajo.

### **1.3. Proyecto SISPYR**

El proyecto SISPYR (Sistema de Información Sísmica de los Pirineos), programa europeo Interreg IVA 2007-2013 Francia-España-Andorra, está siendo llevado a cabo con la participación del IGC (Institut Geològic de Catalunya) como líder del proyecto, la OMP (Observatoire Midi-Pyrénées) y el BRGM en Francia, y el IGN (Instituto Geográfico Nacional) y la UPC (Universidad Politécnica de Cataluña) en España. Surge como necesidad de mejorar la cobertura de la red de estaciones sísmicas ubicada en los Pirineos, permitiendo garantizar la homogeneidad en la calidad de la información. Dicha necesidad se genera debido a que la distribución actual de las estaciones se llevó a cabo sin una verdadera concertación entre los cinco principales operadores (OMP, BRGM y CEA en la parte francesa e IGN e IGC en la

española), por lo que la cobertura existente está totalmente inadaptada a la vigilancia sísmica transfronteriza.

El objetivo de los trabajos propuestos relativos al tiempo real consiste en optimizar la adecuación de los medios científicos a la preparación de la gestión de crisis sísmicas en el espacio pirenaico y con ello mejorar la cobertura de la red sísmica que se encuentra en los Pirineos. También se busca evaluar la prevención del riesgo sísmico para las poblaciones ubicadas en la cadena pirenaica de Francia, España y Andorra. Para ello se desarrollaran herramientas que respondan a las implicaciones prácticas y sociales que la actividad sísmica tenga sobre la zona.

El proyecto se divide en 7 acciones independientes:

Acción 0: Organización general del programa. Es la acción inicial del proyecto. Comprende tener en cuenta las acciones necesarias para la buena ejecución técnica y administrativa del programa desde su fase de montaje, pasando por su fase de realización, hasta la evaluación. Integra principalmente la fase de preparación del proyecto, con la coordinación y la gestión administrativa del proyecto y permite una evaluación externa del programa con la creación de un Comité Científico y un Comité de Observación, que une tanto a los colaboradores técnicos y financieros como a los usuarios finales del programa.

Acción 1: Enriquecimiento de la red de observación sísmica de los Pirineos en tiempo real: actualización de material y nuevas instalaciones. Para ello se adaptarán 22 estaciones acelerométricas y se instalarán 7 nueva estaciones de banda ancha, todas ellas de transmisión en tiempo real. También se creará un grupo transfronterizo de expertos en investigación postsísmica.

Acción 2: Intercambio de datos entre los participantes del proyecto. Se realizará el intercambio de formas de onda de las estaciones sísmicas y acelerométricas para la detección de eventos en tiempo real y para el procesado automático de los eventos detectados, en casi tiempo real. También se busca generar un sistema único de almacenamiento para el conjunto de datos obtenidos de las estaciones sísmicas y acelerométricas.

Acción 3: Conocimiento de los fenómenos – desarrollo metodológico. Esta acción se centra en la comprensión de los fenómenos naturales con el fin de evaluar sus consecuencias. Para ello se realizará el estudio de la fuente sísmica, catálogo sísmico y tensores de momentos sísmicos automáticos, así como de los riesgos sísmicos y la ley de atenuación de sismos que caracteriza la zona.

Acción 4: Prevención del riesgo sísmico. Es dentro de esta acción que se desarrolla el presente trabajo. Con esta, se pretende cumplir con uno de los objetivos principales del proyecto que es el relacionado a la prevención del riesgo sísmico. Para ello, y a fin de poder ofrecer una página web que proporcione una cartografía de como se sintió determinado sismo en la región inmediatamente después de ocurrido un evento sísmico, se propondrá un mapa del movimiento del suelo (“shake-map”) para la región que abarca la totalidad de los Pirineos a ambos lados de la frontera. Todas las cartografías obtenidas servirán para comparar los efectos observados durante sismos reales. Para proponer escenarios de daños, pasando por la determinación de la peligrosidad local y la vulnerabilidad sísmica de los inmuebles existentes, se seleccionarán zonas piloto en las que se aplicarán los conocimientos adquiridos en proyectos anteriores (RISK-UE e ISARD). Por último, los métodos propuestos podrán ser calibrados tras la aplicación de la experiencia obtenida en sismos recientes.

Acción 5: Prevención del riesgo – viabilidad de un Sistema de alerta precoz (EWS, Early Warning System). Con esta acción se busca mejorar la gestión de la crisis a través del estudio de viabilidad de un sistema de alerta sísmica precoz basado en el aprovechamiento de la red de vigilancia sísmica existente. De acuerdo a la base física de EWS, las ondas que presentan riesgo de generar fuertes movimientos del suelo son las de cizalla y las superficiales, pero la velocidad de propagación de estas es menor que la de las ondas electromagnéticas utilizadas para la transmisión de la alerta. Esta diferencia entre el tiempo de propagación de dichas ondas es el que se define como plazo de alerta sísmica. Para cumplir con esta acción hay que realizar diversos trabajos dentro de los cuales están los relativos a la arquitectura del sistema, procesamiento de los datos en tiempo real, elaboración de alertas precoces y la viabilidad de un EWS pirenaico a través de una fase de pruebas.

Acción 6: Uso compartido y difusión de la información relativa al proyecto. Acción que implica la aplicación de mecanismos de difusión, intercambio y valoración de la información obtenida durante la realización del proyecto, haciendo énfasis en las actividades destinadas a proporcionarle al público información referente al riesgo sísmico. Para ello se pretenden crear reuniones informativas a nivel local sobre el proyecto y sus resultados en las zonas estudiadas y la transferencia de información por parte de los comités de dirección de las acciones a los responsables de las acciones del riesgo (escala local, regional y nacional). También se pretende crear un sitio web referente al proyecto, generar documentos de sensibilización al riesgo sísmico a nivel de los Pirineos que integren los resultados del proyecto y las acciones llevadas a cabo por los socios del proyecto y que sean distribuidos a la población pirenaica en forma de folletos.





---

## **CAPÍTULO 2**

### **DESCRIPCIÓN DE LA ZONA EN ESTUDIO**

---



## 2.1. Ubicación geográfica

El Valle de Arán es una comarca catalana situada en los Pirineos centrales (provincia de Lérida, España). Limita al norte con Francia (departamento de Alto Garona), al suroeste con la provincia de Huesca (Baja Ribagorza), al sur con la comarca catalana de Alta Ribagorza y al este con la de Pallars Sobirà (figura 2.1). Tiene una superficie de 633.6 km<sup>2</sup>, ocupando el 1.97% de Cataluña. Cuenta con 10.194 habitantes y su capital es la localidad de Vielha.

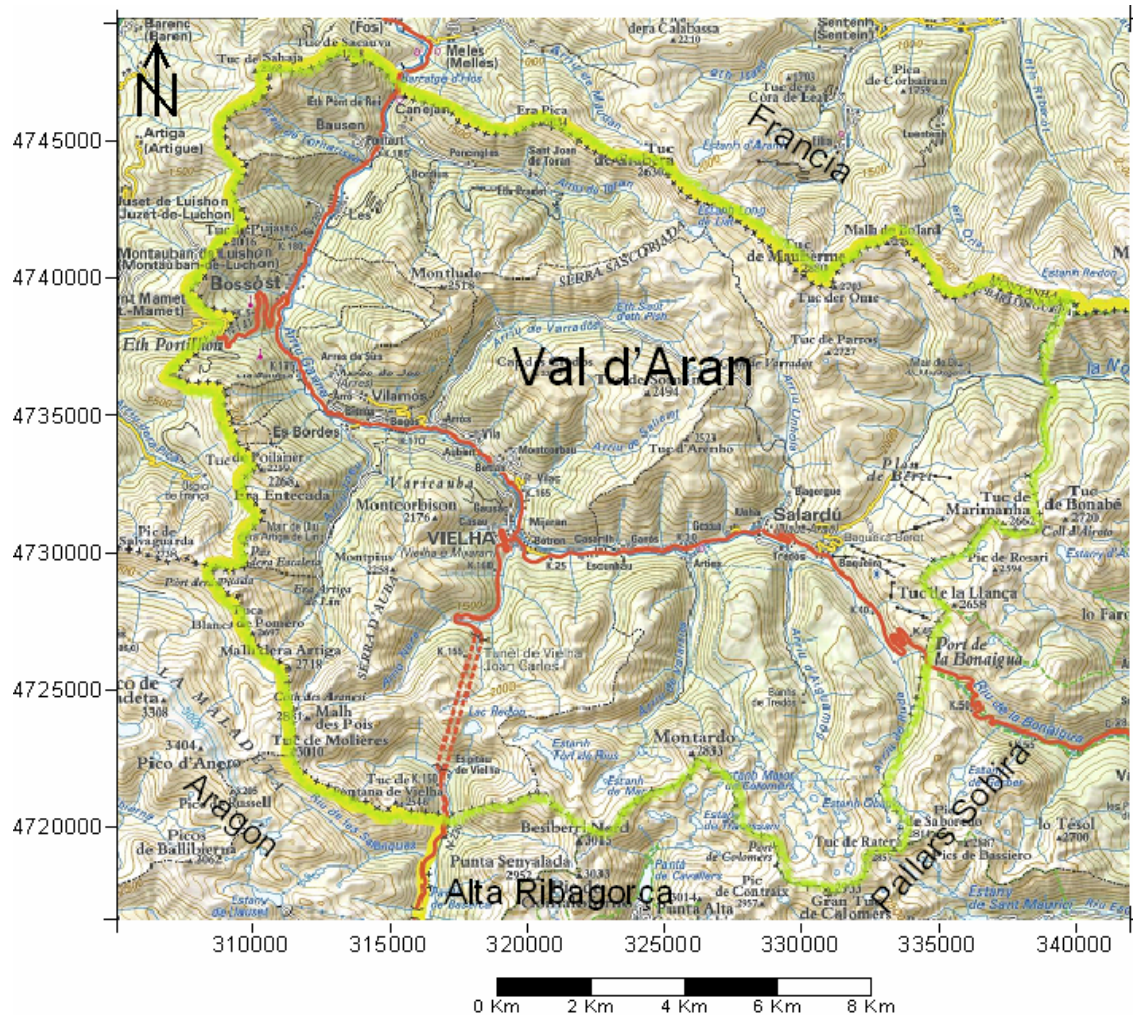


Figura 2.1. Ubicación geográfica del Valle de Arán (I.C.C. 2010).

El Valle de Arán es la única comarca catalana que pertenece en gran parte a una cuenca atlántica. Esto es debido al Garona, río que nace del Glaciar del Aneto, Pirineo Aragonés, para luego cruzar al Valle de Arán, desembocando en el Océano

Atlántico después de atravesar toda Gascuña. También tiene una pequeña parte de cuenca mediterránea, ya que el río Noguera Pallaresa nace a un centenar de metros de Garona, pero inicia el curso en dirección contraria.

## **2.2. Descripción geológica**

En esta sección se presenta una breve descripción de las características estructurales de la cordillera pirineica, que es donde se encuentra ubicada la zona en estudio. Luego se hace mención de las características litológicas del Valle de Arán. Es necesario señalar que existe poca literatura que haga referencia a los depósitos cuaternarios en el Valle de Arán.

### **2.2.1. Geología estructural**

Los pirineos son un orógeno alpino de doble vergencia norte-sur formado por la convergencia de las placas Ibérica y Euroasiática durante el Mesozoico-Cenozoico (Choukroune y ECORS, 1989; Muñoz, 1992). La fase de máxima compresión tuvo lugar en el Eoceno-Oligoceno, hace aproximadamente 40 M.a. (Beamont et al., 2000). La convergencia, y por tanto, la estructuración compresiva, cubren un amplio período de tiempo. En el Pirineo Central y Oriental, este período abarca desde el Cretácico hasta finales del Oligoceno.

De acuerdo a Otuño (2008), el Pirineo Central, que es donde se localiza el área en estudio, se caracteriza por un sistema de mantos cabalgantes que se disponen en forma de doble cuña asimétrica. En la zona norte las cuñas vergen predominantemente hacia el norte, y en el sur, hacia el sur. Ambas cuñas se componen de rocas de la cobertera y del basamento. La zona en estudio se localiza en la cuña sur que está formada por un apilamiento de tres mantos cabalgantes: Nogueres, Orri y Rialp (de arriba a abajo). Los cabalgamientos que separan estos mantos son el de Gavarnie y el de Orri (Otuño, 2008).

Geológicamente hablando, el Valle de Arán se encuentra ubicado en el Macizo de la Maladeta, que es una unidad orográfica compuesta por tres batolitos graníticos del Paleozoico superior (Maladeta, Arties y Tredós) y sus aureolas metamórficas. De acuerdo a García-Sansegundo (1991), en el Macizo de la Maladeta se diferencian dos

unidades lito-estructurales principales: a) el dominio de la Alta Ribagorza y b) el dominio del Valle de Arán.

En su trabajo, Otuño (2008), indica que el dominio del Valle de Arán corresponde al bloque superior del cabalgamiento de Gavarnie y sólo presenta una estructura principal, el sinclinorio del Valle de Arán, en la que están emplazados los batolitos de Arties y Tredòs. Se trata de rocas meta-sedimentarias (calizas, pizarras y areniscas) del Cambroordovícico al Carbonífero, de bajo metamorfismo, salvo en el entorno de las intrusiones, donde se alcanza metamorfismo de grado medio.

Tanto el dominio del Valle de Arán como el de la Ribagorza, presentan una estructura muy similar con presencia de dos generaciones de pliegues variscos, de dirección aproximada EW, recumbentes o asimétricos y plano axial subvertical, con desarrollo de foliación alpina. Ambos dominios forman parte de la supraestructura varisca, representada por niveles superiores de la corteza que, a diferencia de los materiales de la infraestructura, están caracterizados por metamorfismo de bajo grado y no presentan foliación subhorizontal. Según García Sansegundo (1992), las principales diferencias estructurales de estos dominios son: 1) la rotación alpina de las estructuras variscas, que en el dominio del Valle de Arán son muy leves mientras que en el dominio de la Ribagorza conllevan un fuerte buzamiento de las estructuras hacia el S; 2) la orientación de los ejes de los pliegues de tercera fase varisca (3D) que en el dominio del Valle de Arán siguen la dirección 110° E y cabecean al E (30-50°) mientras que en el dominio de la Ribagorza siguen una dirección EW y son subhorizontales; 3) la presencia de pliegues de orden menor NS en el dominio de la Alta Ribagorza.

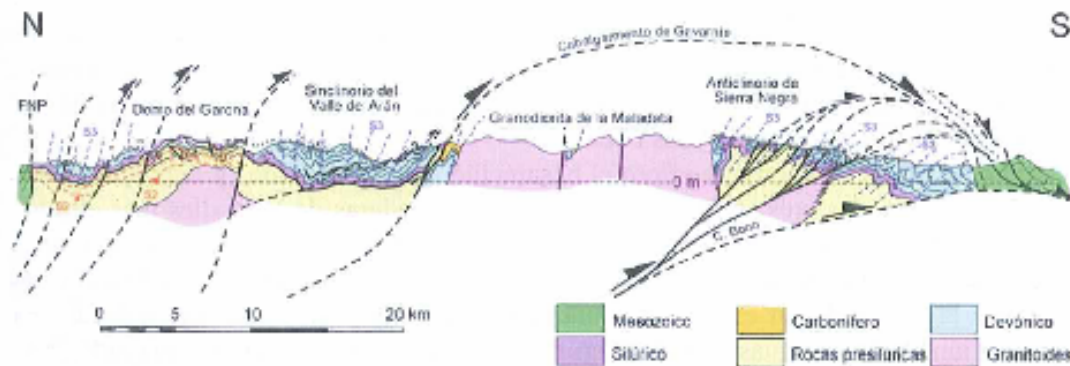


Figura 2.2 Corte geológico de la zona axial en la transversal N-S que incluye la Maladeta (tomado de García Sansegundo, 2004).

### **2.2.2 Descripción litológica**

El sustrato rocoso de Valle de Arán forma parte del eje central de la cordillera Pirinenca y esta constituido principalmente por rocas paleozoicas plegadas durante la orogenia herciniana. También se encuentran intrusiones de rocas plutónicas tardohercinianas, consideradas como el basamento del Pirineo.

A partir del Oligoceno superior, con el pirineo ya construido por la orogenia alpina y con un relleno ya madurado, comienza la distensión con fracturación y rejuvenecimiento del relleno que determina la presencia de cuencas lacustres, como la de la Cerdaña, que se ve reducido en el Valle de Arán a una pequeña zona con lignitos y depósitos lacustre localizados a ambas vertientes del Valle de Aiguamòg, a la altura del collar de Prüedo.

En la literatura actual se maneja poca información referente a los depósitos cuaternarios en la región del Valle de Arán. Sin embargo, en el Atlas de Val d'Aran, se indica que la erosión fluvial con influencia glaciar en la zona ha generado el relleno actual con escasos depósitos cuaternarios, predominando así la erosión sobre la acumulación de sedimentos. Bordonau et al. (1989) indican que la acción erosiva de los glaciares de valles cuaternarios pirineicos es evidente en el modelado de los circos y valles glaciares. Durante la retirada de las lenguas glaciares cuaternarias, las cubetas generadas debido a la erosión fluvial con influencia glaciar fusionaron como sendos ambientes lacustres proglaciares, produciéndose un importante proceso de colmatación hasta el final de la glaciación. La etapa final de este relleno sedimentario está representada por los sedimentos aluviales de la llanura aluvial actual y por los sedimentos fluvio-torrenciales (conos de deyección) situados en las zonas de confluencia de los valles tributarios con el valle principal (Bordonau et al. 1989).

En la Figura 2.3 se presenta el mapa geológico, escala 1:50.000, correspondiente a todo el territorio de la comarca del Valle de Arán. Puede observarse como predominan las rocas del Paleozoico a lo largo de toda la comarca. En la esquina superior izquierda se muestra la leyenda correspondiente.



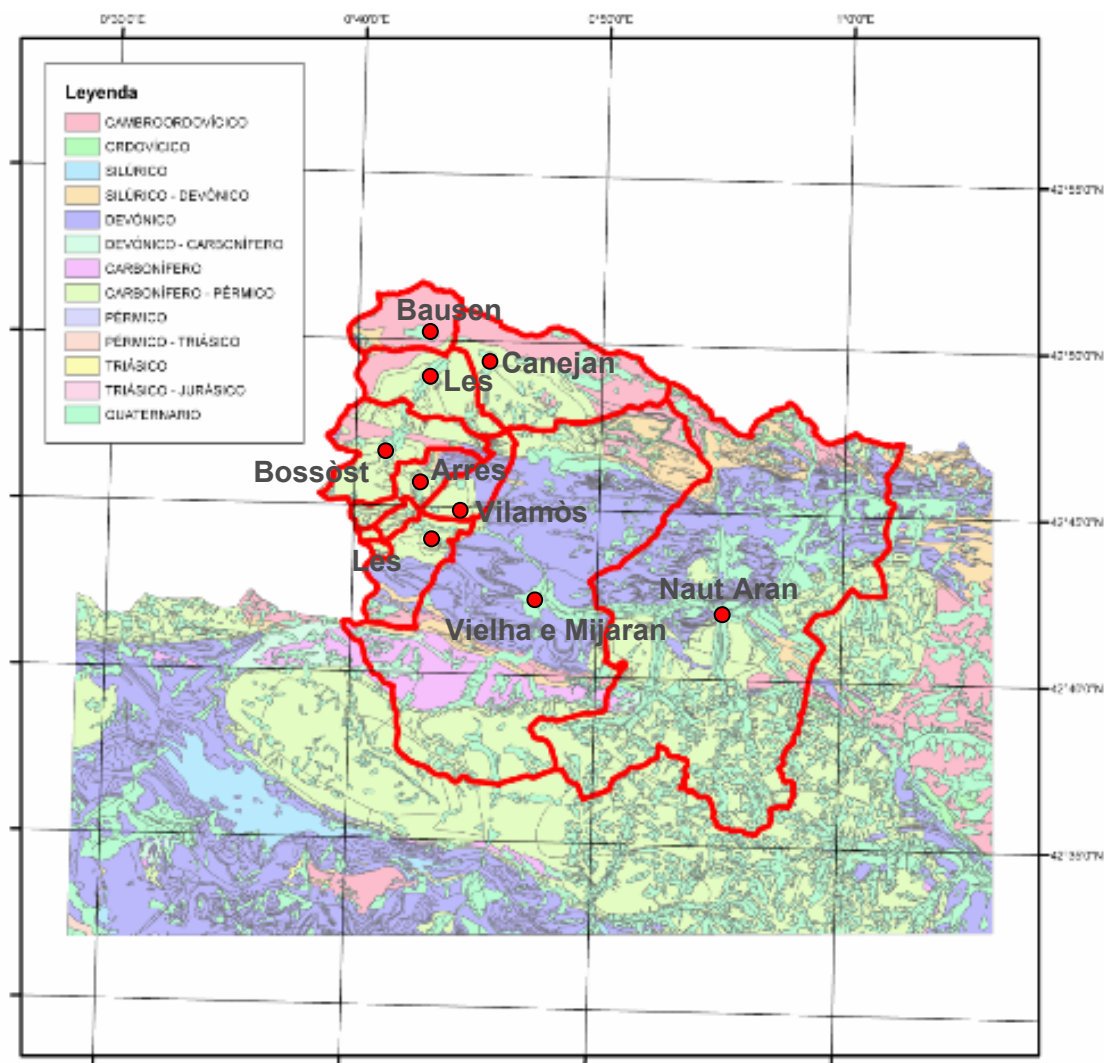


Figura 2.3. Mapa geológico del Valle de Arán. Escala 1:50.000

### 2.3. Descripción topográfica

El Valle de Arán, por estar ubicado en los Pirineos centrales, se caracteriza porque el 30% de su territorio se encuentra por encima de los 2000 metros de altitud. El pico más elevado es el Besiberri Nord con 3015 m. seguido del pico de Molieres con 3010 m. También destaca el Malh de Pois con 2881 m, el Gran Tuc de Colomèrs con 2933 m y el Montardo con 2833 m. Las montañas constituyen una barrera natural que ha condicionado históricamente la comunicación con tierras vecinas, especialmente con Aragón y Cataluña, mientras que el curso del río Garona abre camino hacia tierras gasconas.



Vielha, capital del Valle de Arán, se encuentra ubicada a 980 m sobre el nivel del mar en una llanura ondulada en la margen izquierda del río Garona en su afluencia con el río Negro, y rodeada de elevadas sierras, casi siempre cubiertas de nieve.

En la tabla 2.1 se indica la altitud y la superficie correspondiente a s 9 municipios que conforman al Valle de Arán.

Tabla 2.1. Altitud y superficie de los 9 municipios que conforman el Valle de Arán.

Municipio	Altitud (m)	Superficie (Km <sup>2</sup> )
Bausen	934	18
Canejan	906	49
Les	634	23
Bossòst	710	28
Arrès	1267	12
Vilamòs	1200	15
Es Bòrdes	852	22
Vielha e Mijaran	980	206
Naut de Arán	1267	247

---

## **CAPÍTULO 3**

### **MÉTODO DEL COCIENTE ESPECTRAL H/V**

---



### **3.1. Marco Teórico. Desarrollo y evolución del método**

Los suelos compuestos por materiales blandos y/o poco consolidados pueden generar una amplificación de las ondas sísmicas, sin embargo hay que tomar en cuenta que dicha amplificación no va a ocurrir de igual manera para todos los rangos de frecuencia. El cociente espectral existente entre el movimiento del suelo en superficie y el del basamento rocoso se conoce como función de transferencia y permite estimar como será la amplificación que presentará determinado suelo para cada valor de frecuencia. Generalmente, la frecuencia más baja, que presenta un pico, coincide con el valor de frecuencia generadora de la máxima amplificación del suelo y se le conoce como frecuencia fundamental del suelo.

El implementar tecnologías de bajo costo para determinar la función de transferencia y así evaluar los efectos de sitio es una necesidad, debido a que las metodologías convencionales requieren de grandes inversiones (Alfaro et. al. 1999). Los métodos llamados convencionales incluyen campañas específicas de perforación, muestreo y ensayos de laboratorio.

La utilización de ruido sísmico para hallar las diferentes características del subsuelo se ha llevado a cabo a partir de los años cincuenta y se ha convertido en una herramienta valiosa para evaluar efectos locales.

Kanai y Tanaka (1961) son los pioneros en la utilización del ruido sísmico para la caracterización de efectos de sitio. Ellos consideran que la amplitud del ruido sísmico en superficie aumenta en aquellos períodos que están sintonizados con el período natural del subsuelo por el hecho de la resonancia relativa.

El ruido sísmico fue definido por Kanai y Tanaka (1961) como vibraciones del suelo con amplitudes entre 0,1 y 1.0 micrones y con períodos entre los 0.05, 0.10 a 1.0-2.0 segundos. Es producido por eventos artificiales como el tráfico, maquinaria pesada, entre otros. Están compuestos básicamente por ondas Rayleigh de período corto. Tienen como ventaja su estabilidad en comparación con los sismos y que los registros se pueden realizar con estaciones móviles de un solo equipo, pudiendo así cubrir grandes áreas en tiempos relativamente cortos (Moreno y Alfaro, 2000).

Luego de realizadas varias observaciones simultáneas de ruido sísmico a diferentes profundidades utilizando un vibrógrafo autonivelante, Kanai y Tanaka (1961) concluyeron que:

- La distribución de períodos varía con la profundidad
- La variación de la distribución de amplitudes con la profundidad no es simple ni formulable.
- A partir de la comparación de lo obtenido con ruido sísmico y con sismos, el registro del ruido sísmico en superficie permite determinar el período de resonancia que se obtiene con el sismo, ya que este se encuentra estrechamente relacionado con el período más frecuente en el ruido sísmico.
- En lugares donde la curva de distribución presenta un único pico, dicho período coincide claramente con el período predominante de los movimientos sísmicos.

Bard (1999) define el ruido sísmico como el movimiento del suelo causado por fuentes no sismogénicas. La generación de ruido sísmico puede ser debida a: ondas oceánicas distantes que generan energía entre  $<0.3-0.5$  Hz, ondas marinas en costas cercanas ( $0.3-0.5 - 1$  Hz) y energía debida a la actividad humana (tráfico, maquinaria pesada, etc.) ( $>1$ Hz) (Bard, 1999).

Posteriormente, en 1989, Nakamura se propone estudiar la naturaleza del ruido sísmico y su aplicabilidad para evaluar los efectos de sitio. En su trabajo buscaba estimar el factor de amplificación generada debido a la multiplicación de las diversas refracciones que sufre la onda incidente. Para ello, considera como ruido a las ondas Rayleigh contenidas en el ruido sísmico, por lo que han de ser eliminadas.

Para la realización de su estudio, Nakamura (1989) se basa en las siguientes tres suposiciones:

1. Una función de transferencia ( $S_T$ ) del suelo está dada por la razón espectral de los movimientos horizontales en superficie ( $S_{HS}$ ) con los del basamento ( $S_{HB}$ ).

La relación espectral del movimiento vertical ( $E_S = S_{VS} / S_{VB}$ ) tiene en cuenta los efectos de las ondas Rayleigh.

2. El ruido sísmico en el suelo contiene ondas Rayleigh pero sus efectos aparecen iguales en ambos componentes horizontal y vertical. Un nuevo parámetro  $S_{TT} = S_T / E_S = S_{HS} / S_{VS} / S_{HB} / S_{VB}$  da una función de transferencia fiable porque los efectos de las ondas Rayleigh se compensan en  $S_{TT}$ .
3. La relación espectral de las componentes horizontales y verticales del ruido sísmico en basamento ( $S_{Hb} / S_{Vb}$ ) es aproximadamente 1, entonces  $S_{TT}$  se estima por la relación espectral de horizontal a vertical en superficie.

$$S_T = \frac{S_{HS}}{S_{HB}} \quad S_T \approx \frac{S_{HS}}{S_{VB}} \quad (3.1)$$

El método desarrollado por Nakamura (1989) para la obtención de la función de transferencia a partir de ruido sísmico registrado en superficie, ha sido utilizado en varias partes del mundo debido a las ventajas que tiene sobre el procesamiento de la información. Sin embargo posee ciertas limitaciones ya que se encuentran diferencias entre la función de transferencia estimada y la real para diferentes tipos de suelos, así como los períodos dominantes y la amplificación (Nakamura 1989, 2000).

La importancia de considerar la función de coherencia de las señales es evidente, ya que la presencia de ruidos aditivos incorrelacionados afecta la estimación de la función de transferencia. A partir del cálculo de la función de coherencia hallada entre dos registros temporales arbitrarios se podrá minimizar el ruido presente tanto en la señal de entrada como en la de salida (Acevedo, 2001).

Para el caso ideal de un sistema lineal de parámetros constantes donde se tiene claramente definida una única entrada y una única salida se tendría entonces que la función de coherencia es igual a la unidad. Por otra parte si  $x(t)$  e  $y(t)$  no tienen ninguna relación, la función de coherencia será igual a cero, lo cual indicaría que estos dos registros no serían válidos para la obtención de la función de transferencia de este sistema. En casos en que la función de coherencia sea mayor que cero pero menor a la unidad, puede estar sucediendo una o más de las siguientes tres posibles situaciones físicas existentes (Bendat y Piersol, 1986):

- Existan ruidos extraños presentes en las medidas.
- El sistema  $x(t)$  e  $y(t)$  no es lineal.
- $y(t)$  es una salida que no depende de una única entrada  $x(t)$ .

Las nuevas tecnologías incluyen el análisis de ruido sísmico con modernas técnicas de análisis de señales, que contemplan la minimización del ruido incorrelacionado presente en los registros sísmicos. Con estas tecnologías se contribuye a la microzonificación de las ciudades mejorando considerablemente el conocimiento de la amenaza sísmica local.

Ventajas y limitaciones del método de Nakamura (1989) y medición del ruido sísmico:

*Ventajas:*

1. Giraldo et al. (1999) establecen que, desde el punto de vista práctico, lo más destacable es lo referente a los costos, ya que para la obtención de registros de movimientos sísmicos fuertes se requiere de una red permanente, la cual a su vez puede registrar movimientos sísmicos débiles, siempre y cuando el algoritmo de disparo se programe adecuadamente; mientras que el registro del ruido sísmico se puede realizar con estaciones provisionales, lo cual implica que un mismo equipo puede cubrir extensas áreas en períodos de tiempo relativamente cortos. Por su parte, Alfaro et al. (1999) plantean en su trabajo que, sin lugar a duda, la facilidad a la hora de realizar las mediciones y el procesamiento de los datos obtenidos con el método de H/V, es la ventaja más importante del mismo.
2. El método Nakamura permite diferenciar tipos de material no solo a partir del período predominante del suelo, sino también en cuanto a la amplitud del microtemblor (Lermo y Chávez-García 1994, Alfaro et al. 1999, Euroseismod 1998, entre otros), e incluso ha servido para modificar planos geotécnicos de ciudades como Lieja, Bélgica (Euroseismod 1998).
3. A pesar de que los niveles de ruido varían sustancialmente a lo largo del día (Kanai y Tanaka, 1961, Nakamura, 1989), los cocientes

espectrales aparecen constantes y se encuentra que el período predominante del suelo también, con variaciones de la amplitud del mismo.

4. Como otra ventaja importante, Alfaro et al. (1999) señalan que, para la aplicación del método, es indiferente que se realicen las mediciones con acelerómetros o con velocímetros, siempre y cuando los niveles de ruido ambiental sean de cierta consideración, como es el caso de grandes ciudades.
5. Alfaro et al. (1999) indican en su trabajo que a partir de los análisis de estacionariedad se puede determinar la presencia de fuentes fijas que excitan el suelo a una determinada frecuencia.

#### *Limitaciones:*

1. Dentro de las limitaciones que presenta el método de Nakamura, Alfaro et al. (1999) señalan como la más importante que el mismo posee vacíos teóricos, trayendo como consecuencia que este funcione en determinados casos mientras que en otros no.
2. En casos en los que la frecuencia de la señal y la del ruido antrópico se encuentran dentro de un rango similar, las amplitudes son totalmente diferentes y además significativas, por lo cual se estaría haciendo una sobre estimación de este registro en el caso de utilizar como método para la determinación de la función de transferencia el de Nakamura (Acevedo, 2001).
3. Según Nakamura (1989), el método del cociente espectral permitiría obtener la función de transferencia aproximada del suelo tanto, los períodos predominantes del suelo como las amplificaciones asociadas, sin embargo, algunas investigaciones teóricas y experimentales (Lachet y Bard, 1994) han demostrado que solo permitiría determinar los períodos predominantes del suelo y no la amplificación.
4. A pesar que el método aporta gran cantidad de información en tiempos y a costos reducidos, para labores de microzonificación sísmica hay que acompañar la información obtenida con otras metodologías, proponiendo así dos métodos alternativos para evaluar la relación de H/V; una basada en el cociente energético de las señales a partir de la



evaluación de las densidades espectrales y la segunda que toma en cuenta la coherencia de las componentes vertical y horizontal, ya que la coherencia mostraría la linealidad del modelo considerado (Bendat y Piersol, 1986).

5. Una limitación que tiene el uso del ruido sísmico se debe a que aún no se ha encontrado una relación numérica entre el período obtenido con movimientos sísmicos fuertes y el período obtenido de mediciones del ruido sísmico, además que la función de transferencia obtenida mediante el método del cociente espectral (Nakamura 1989, 2000) sólo permite determinar el período predominante del suelo.
6. Otra limitante se debe al potencial de información contenido en el ruido sísmico debido a la naturaleza de este, es decir, que pueden contener partes o ruidos incoherentes. (Tokimatsu et al., 1989)

Luego de los estudios realizados por Nakamura en 1989, otros autores (Bonhefoy-Claudet et al., 2004, proyecto SESAME 2004) han tratado de llenar los vacíos teóricos presentes en el método planteado.

Durante su realización, los participantes del proyecto SESAME (2004) se plantean dos interrogantes que consideran indispensables para entender la naturaleza física y la composición del campo de ondas sísmicas de ruido ambiental, especialmente en zonas urbanas. Estas interrogantes son:

¿Cuál es el origen de las vibraciones de ruido ambiental (dónde se originan y cuáles son las fuentes)?

¿Cuál es la naturaleza de las ondas correspondientes, es decir, son ondas superficiales u ondas de cuerpo? En las ondas superficiales, ¿qué relación existe entre las Rayleigh y las Love? y ¿qué relación existe entre el modo fundamental y los modos más altos?

En estudios realizados por Bonhefoy-Claudet et al. (2004), se indica que el ruido sísmico de baja frecuencia está compuesto, en su mayor parte, por el modo fundamental de las ondas Rayleigh. Para llegar a esta conclusión se tomaron en

cuenta diferentes enfoques, siendo el análisis de la amplitud del ruido sísmico en profundidad uno de ellos. Con respecto a las altas frecuencias, se indica que la relación existente entre las ondas Rayleigh y las Love es proporcional, observándose una ligera tendencia de aumento de la energía transportada por las ondas Love. Los resultados presentados por Bonnefoy-Claudet et al. (2004), a pesar de ser parciales, sugieren que el campo de ondas sísmicas de ruido es complejo, sobre todo en las altas frecuencias, cuyo origen se atribuye a la actividad humana.

El proyecto SESAME (2004) en su informe indica que, dado que el campo de ondas del ruido es una mezcla de ondas Love, Rayleigh y ondas de cuerpo, el origen de los picos y valles observados en el espectro de H/V es múltiple. Destacándose entre estos la elasticidad de las ondas Rayleigh, la fase de los modos de las ondas Love y la resonancia de las ondas de cuerpo.

Con respecto a la elipticidad de las ondas Rayleigh, el proyecto SESAME (2004) indica que dichas ondas se caracterizan no sólo por su velocidad de fase sino también porque presentan un movimiento elíptico de la partículas en el plano radial. Para estructuras con una sola capa se sabe que la relación H/V de todos los modos presentes en las ondas Rayleigh, viene siendo una la relación de elipticidad de la misma. Para todas las frecuencias para las cuales existen simultáneamente varios modos, siempre existe un modo de onda de Rayleigh (a menudo la fundamental), que lleva un poco más de energía en la componente vertical. Esta conclusión también puede extrapolarse a casos con capas más complejas, bien sean estructuras con más de una sola capa o con gradientes de velocidad. Sin embargo, en estos de casos de estructuras más complejas, hay que tomar en cuenta las variaciones que se pueden presentar en el número de picos presentes en la relación de H/V debidos al comportamiento elíptico de la onda. En tales casos, los resultados muestran que todos los modos de la onda Rayleigh existentes no presentan un único pico de elipticidad común. (Proyecto SESAME, 2004)

Las conclusiones presentadas en el informe del proyecto SESAME (2004), indican que todo lo expuesto anteriormente es válido para el caso de estructuras de capas horizontales, con grandes contrastes de impedancia ( $> 4 - 5$ ) y que los

resultados se vuelven más difusos cuando ocurre una disminución de estos contrastes.

### **3.2. Aplicaciones recientes realizadas por el IGC**

En el marco de diferentes proyectos, el IGC (Instituto Geológico de Cataluña) ha realizado diversos trabajos en los que se han aplicado métodos experimentales y de simulación numérica para evaluar la peligrosidad sísmica a escala local. A continuación se hace mención sobre dichos estudios y se presenta una reseña de los trabajos basados en la aplicación del método del cociente espectral H/V con el objetivo de poder determinar el valor de frecuencia fundamental del suelo en diversas poblaciones. Se describen las campañas de campo y los resultados obtenidos luego de la realización de los mismos.

#### **3.2.1. Microzonación sísmica. Contribución a los estudios de peligrosidad sísmica a escala local en zonas rurales y urbanas.**

Entre los años 2004 y 2005 el Instituto Geológico de Cataluña, como parte del desarrollo de la tesis doctoral de Macau (2008), y dentro del marco de los proyectos ISARD (2004-2008) y ERSE (2004-2006), llevó a cabo el estudio de microzonación sísmica y contribución a los estudios de peligrosidad sísmica a escala local en las poblaciones de Andorra, Cerdaña y Málaga.

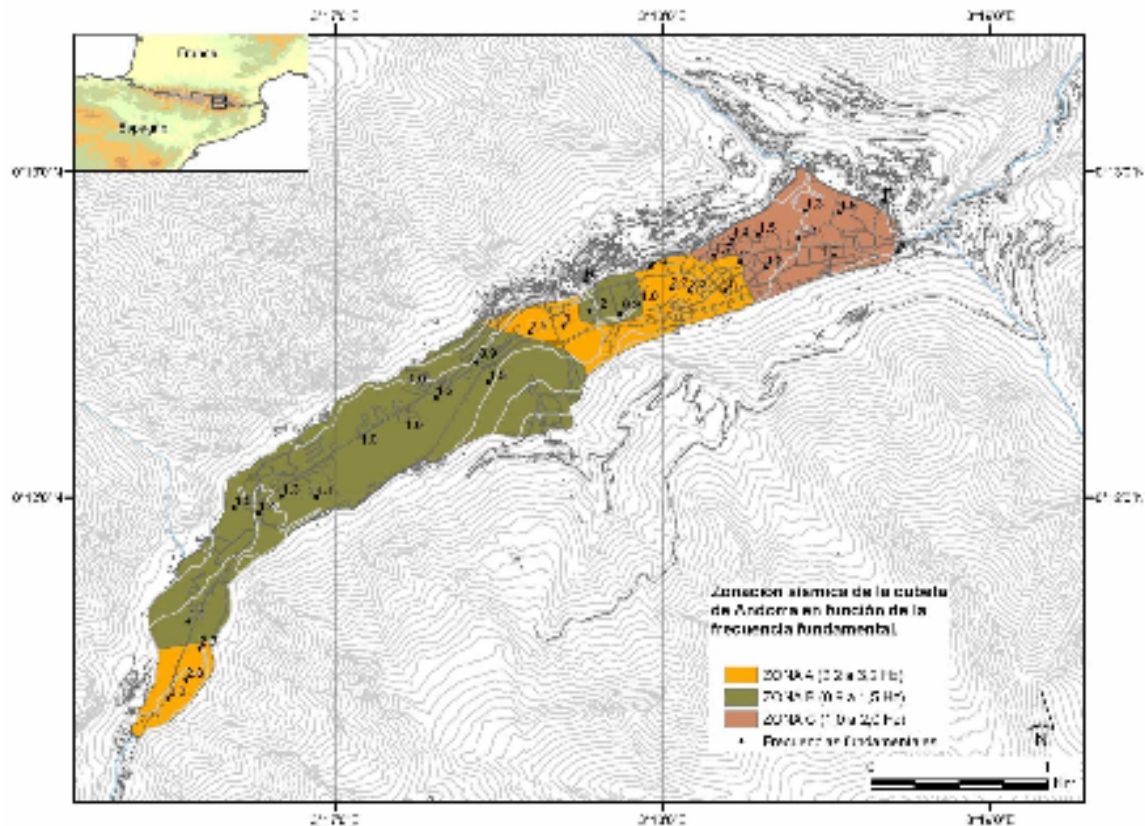
Dentro de los objetivos alcanzados en el trabajo realizado por Macau (2008), se encuentra la zonación sísmica en función del incremento de intensidad macrosísmica y del espectro de respuesta en términos de la aceleración en tres zonas piloto: la cubeta de Andorra la Vella, el valle de la Cerdaña y la ciudad de Málaga.

Para alcanzar estos objetivos se llevaron a cabo campañas de medición del ruido sísmico en las tres zonas piloto mencionadas anteriormente. Todo ello con el fin de determinar la frecuencia fundamental del terreno a partir de la aplicación del método del cociente espectral H/V. En términos generales, para la realización de la campaña de medida de ruido sísmico correspondiente a cada zona piloto, se utilizó un digitalizador CityShark de la casa Leas y un sismógrafo triaxial Lennartz de 5 segundos. Debido a la alta actividad diurna existente en las tres zonas piloto, la mayoría de las mediciones de ruido sísmico se realizaron en horas de la tarde y en

horas de la noche. Esto con el fin de evitar las perturbaciones que la actividad diurna pudiese generar sobre los registros. Durante la medición de ruido sísmico, se utilizaron diferentes valores de ganancia alcanzándose así la máxima resolución del equipo sin llegar a la saturación.

Las primeras mediciones de ruido sísmico se realizaron en el principado de Andorra. Estas se llevaron a cabo entre el 14 y el 18 de Junio de 2004, en las localidades de Margineda, Santa Coloma, Andorra la Vella y les Escaldes – Engordany. La mayoría de las medidas se realizaron en el fondo del valle, sin embargo algunas medidas se llevaron a cabo en laderas, esto con el fin de estudiar los efectos topográficos. En total se realizaron 150 registros en 47 emplazamientos diferentes, tomándose un mínimo de tres registros por emplazamiento. Las medidas fueron realizadas en ventanas de tres minutos a 100 muestras/segundo.

A partir de los valores de frecuencia fundamental del terreno obtenidos en el principado de Andorra, se delimitaron tres zonas principales. Dicha delimitación se puede observar en la figura 3.1, La zona A corresponda al sector donde el valor de frecuencia fundamental varía entre 2.2 Hz y 3.2 Hz, mientras que en la zona B dicho valor se encuentra entre los 0.9 y 1.5 Hz. La zona C corresponde al sector donde la frecuencia fundamental varía entre 1.0 y 2.0 Hz.



*Figura 3.1. Mapa con los valores de la frecuencia fundamental en los distintos emplazamientos de la zona de estudio (tomado de Macau, 2008).*

Las medidas de ruido sísmico realizadas en la comarca de la Cerdaña fueron llevadas a cabo entre el 28 de Junio y el 9 de Julio de 2004. En total se realizaron 350 registros en 115 emplazamientos diferentes. Los registros se distribuyeron a lo largo de una malla en la ciudad de Puigcerdà y en cuatro perfiles que se muestran en la figura 3.2.

Dentro de los resultados obtenidos se tiene que, para el perfil P2 (perfil de Bellver de Cerdaña), la frecuencia fundamental varía desde 0.42 hasta 4.00 Hz, presentando un mínimo en el extremo sur y aumentando su valor en dirección norte. Con respecto al perfil P3 (perfil Alp-Ger), se tiene que la frecuencia fundamental del suelo varía de 0.32 a 5.00 Hz, presentándose los máximos valores al extremo del perfil y los mínimos en la mitad del mismo, comportamiento similar al observado en el perfil P2. El perfil P4 (Osseja-Puigcerdà) presentó valores de frecuencia fundamental del suelo entre los 0.35 y 2.20 Hz. Al igual que en los perfiles P1 y P2, los mayores valores de frecuencia fundamental se encuentran ubicados en los extremos del perfil, quedándose los menores en el centro del mismo. En el último perfil, P5 (perfil Font

Romeu-Eina) se observó que la variación de la frecuencia fundamental no tiene un comportamiento tan homogéneo como el observado en los tres perfiles anteriores. Esto es debido a que la mayor parte del perfil se encuentra sobre roca, roca alterada o una capa muy delgada de materiales blandos. En la figura 3.2 se muestra la distribución del valor de frecuencia fundamental determinado para cada perfil estudiado en el valle de la Cerdaña.

Con respecto a los resultados obtenidos del mallado realizado en la ciudad de Puigcerdà, se tiene que los valores de frecuencia fundamental determinados varían entre 0.32 y 0.70 Hz, ubicándose los mínimos valores al sureste del perfil y los máximos al noroeste. En la figura 3.3 se muestra la distribución de los emplazamientos ubicados en Puigcerdà y el valor de frecuencia fundamental del suelo determinado para cada emplazamiento.

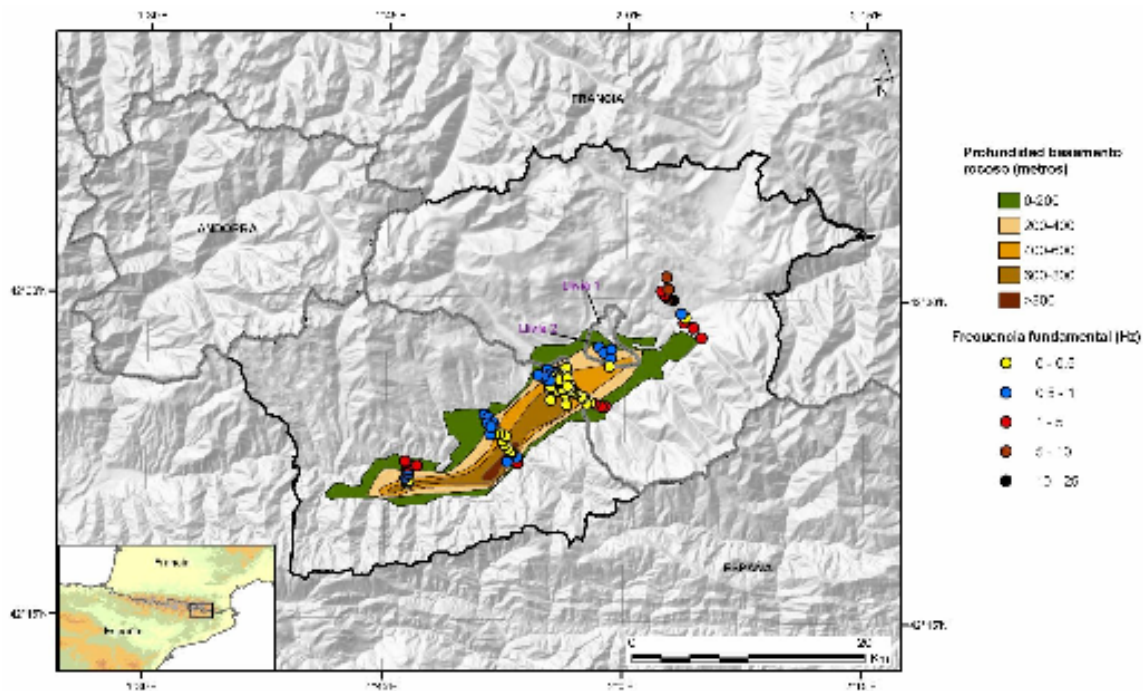
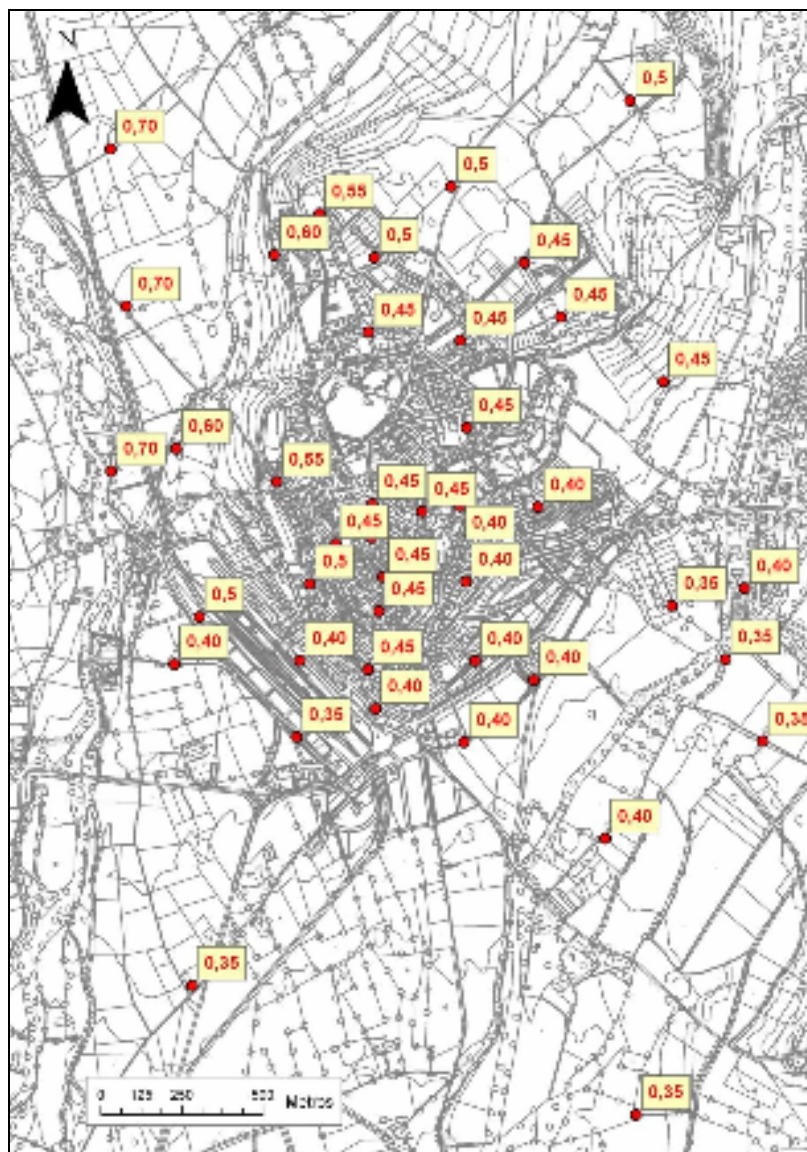


Figura 3.2. Mapa de la distribución de la frecuencia fundamental del suelo en todos los perfiles del valle de la Cerdaña (tomado de Macau, 2008).



*Figura 3.3. Mapa con la frecuencia fundamental calculada en los emplazamientos donde se han realizado las medidas de ruido sísmico en Puigcerdà (tomado de Macau, 2008).*

La ciudad de Málaga fue la última dentro de este estudio en la que se realizaron medidas del ruido sísmico. Dichas mediciones se llevaron a cabo en el 30 de Mayo y el 4 de Junio de 2005. La toma de los registros se realizó en 74 emplazamientos diferentes, distribuyéndose en seis perfiles y una malla ubicada en el centro de la ciudad. Como resultado general obtenido a partir de este estudio, se tiene que el valor de frecuencia fundamental del suelo de la ciudad de Málaga varía entre 0,4 y 4 Hz. Se observó una disminución del valor de la frecuencia fundamental del



suelo hacia el suroeste de la ciudad, disminución que podría estar relacionada con el aumento de la profundidad del basamento rocoso en esta dirección. Los valores mas altos de la frecuencia fundamental del suelo fueron observados en los emplazamientos ubicados al pie de las colinas que rodean a la ciudad de Málaga. En la figura 3.4 se puede apreciar el valor de la frecuencia fundamental del suelo obtenido en cada uno de los emplazamientos estudiados.

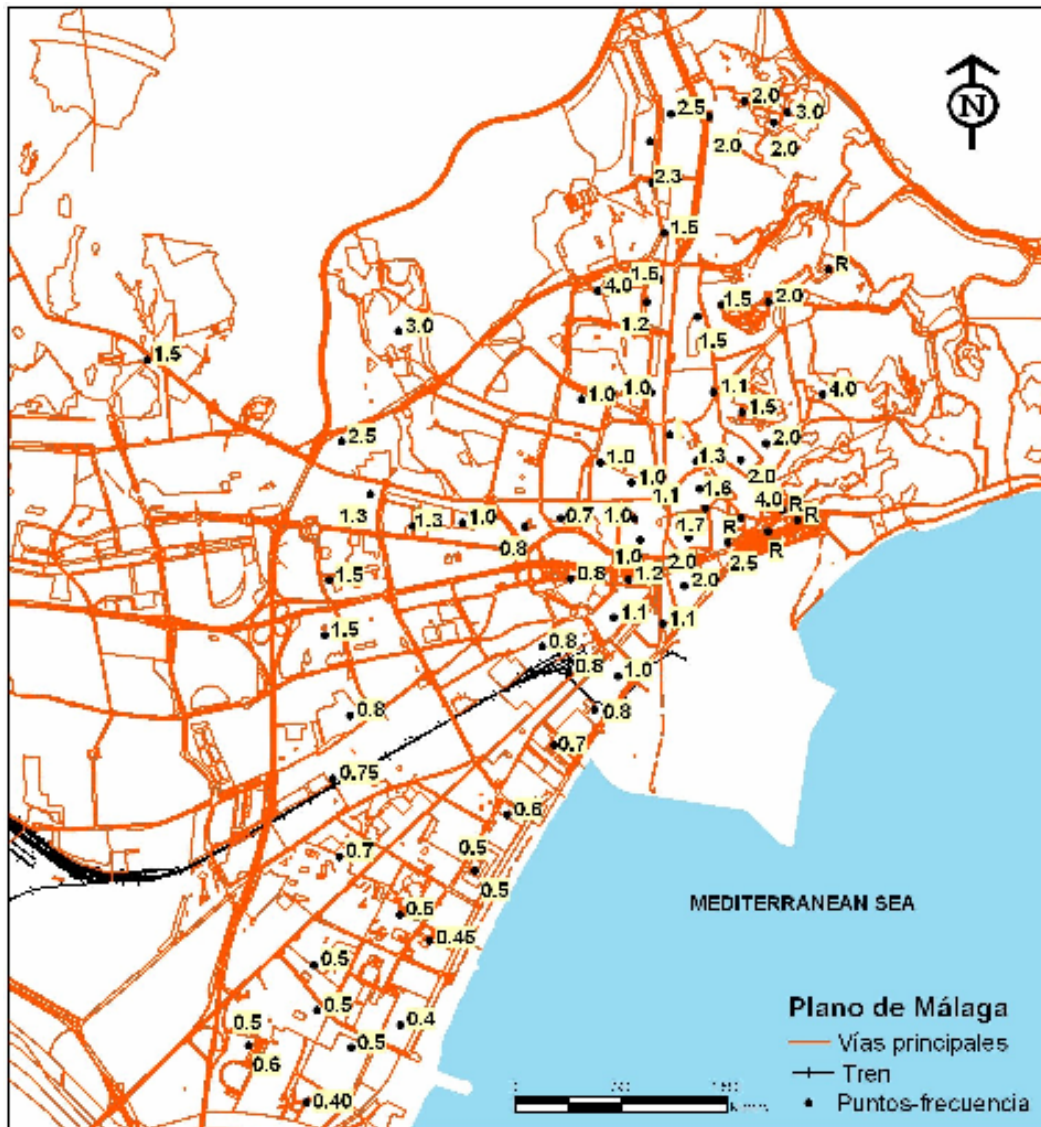


Figura 3.4. Mapa con los valores de frecuencia fundamental obtenidos en los distintos emplazamientos de la zona de estudio (tomado de Macau, 2008).



### **3.2.2. Aplicación de H/V en la Bahía de Cádiz.**

El Instituto Geológico de Cataluña, en el año 2008, como parte del desarrollo de la tesis doctoral de Schmitd (2008), llevó a cabo el estudio de efectos de sitio en la Bahía de Cádiz, España, aplicando el método del cociente espectral H/V.

Las mediciones correspondientes a la técnica de H/V se llevaron a cabo entre el martes 15 y el miércoles 23 de Abril de 2008. Para ello, se contó con un digitalizador CityShark de la casa Leas y un sismómetro triaxial Lennartz de 5 segundos.

La zona en estudio se caracterizó por la presencia de vientos de intensidad moderada a fuerte. Es por ello que los sensores fueron protegidos con cubetas plásticas durante toda la campaña de adquisición. Para evitar la saturación de los sensores se fijó una ganancia de 128 para emplazamientos con presencia significativa de ruido (bien sea viento, paso de vehículos, etc.). Para emplazamientos donde la presencia de ruido fuese menor, la ganancia fue fijada en 512.

Otro parámetro que variaba en función a las características del emplazamiento fue la duración de las ventanas de tiempo. Se utilizaron tiempos de 5, 10 o 20 minutos según fuese el caso. Sin embargo, la más utilizada fue la ventana de 10 minutos, ya que es la más recomendada para encontrar un número de ciclos suficientes para las frecuencias características esperadas en este tipo de emplazamiento.

Durante el procesado de los datos obtenidos se observó que, en muchos casos, las razones espectrales correspondientes presentaron un comportamiento plano y con muy poca amplificación. Esto generó dificultad a la hora de identificar el pico correspondiente al período característico. Este comportamiento fue característico de emplazamientos con suelos rígidos y firmes.

Los resultados obtenidos en medidas realizadas sobre rellenos antrópicos presentaron frecuencias características muy altas o bien, espectros con amplificación cercana a la unidad para casi todo el rango de frecuencias analizado. Estos resultados permiten concluir que el comportamiento en este tipo de emplazamientos es similar al de un suelo firme a pesar de ser antrópicos. Dicha similitud puede ser debida a una labor eficaz durante el proceso de compactación del material.

En términos generales, las frecuencias obtenidas fueron clasificadas en tres rangos:

Menores a 1 Hz, donde los efectos de amplificación serán mayores

Entre 1 y 4 Hz, con efectos de amplificación también significativos.

Mayores a 12 Hz, correspondientes a suelos más rígidos.

En la figura 3.5 se muestra la ubicación de los emplazamientos en lo que se realizaron las medidas (imagen superior) y los resultados de la aplicación de la técnica de H/V en el municipio de Cádiz (imagen inferior).

## Cádiz

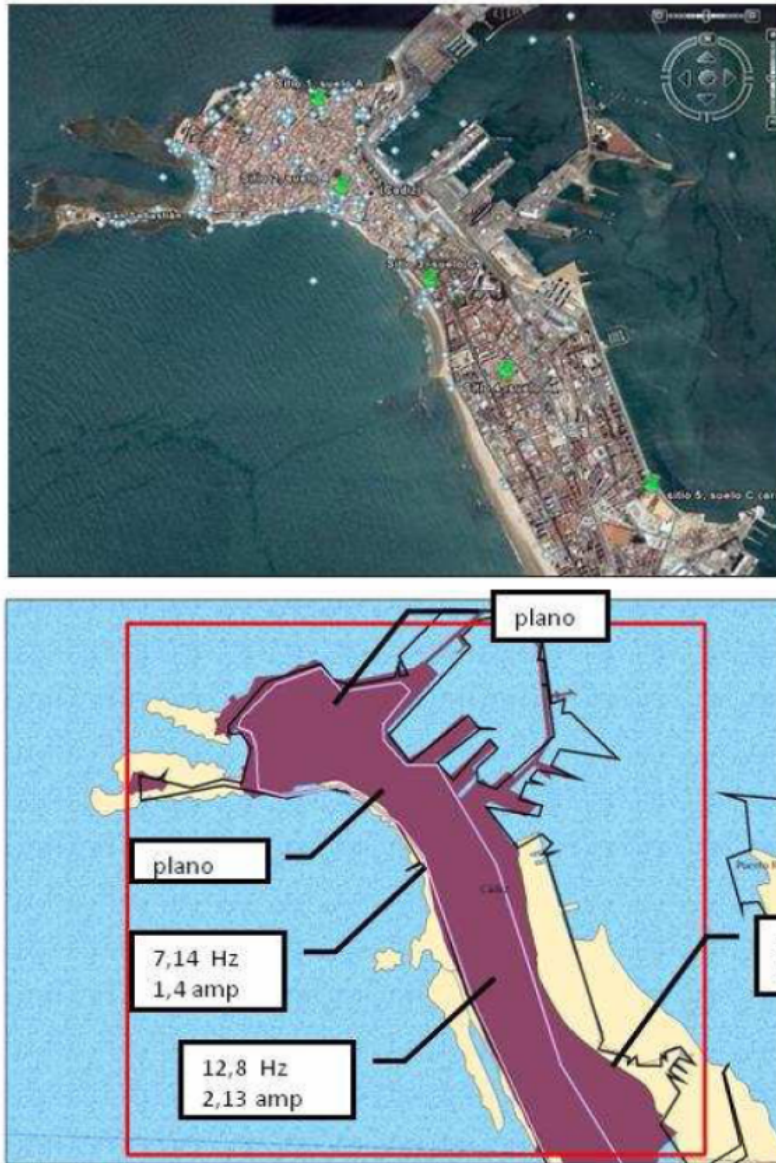


Figura 3.5. Imagen superior: Mapa de ubicación de puntos de medida para la aplicación de la técnica H/V en Cádiz. Imagen inferior: valores de frecuencia fundamental  $f_0$  y su respectiva amplitud (tomado de Schmitd, V. 2008).

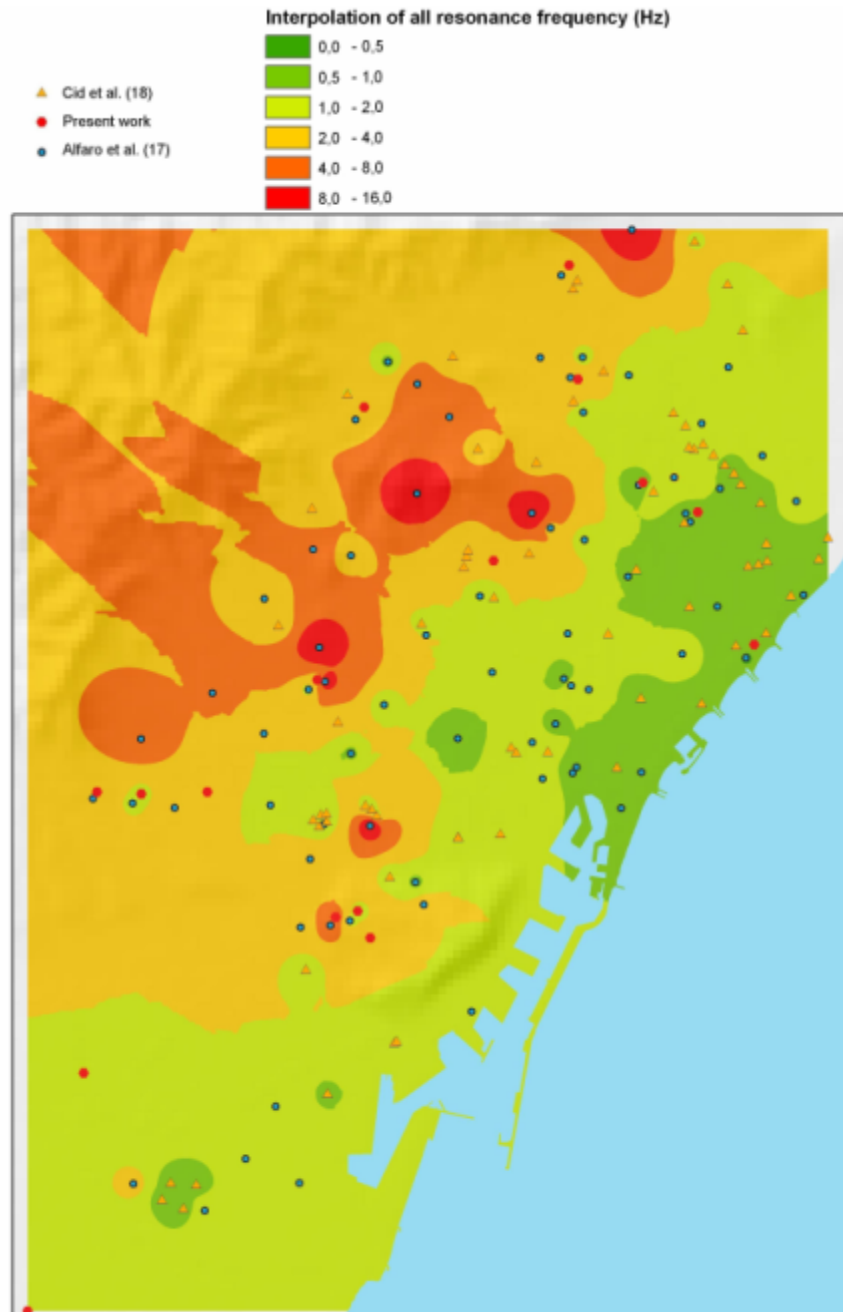
### **3.2.3. Ambient vibrations measurements in Barcelona for soil characterization.**

Como parte del proyecto SINEPI, 2008, el Instituto Geológico de Cataluña realizó el estudio de los efectos de sitio que puede sufrir la ciudad de Barcelona determinando que las áreas que presentan mayor peligrosidad a la hora de la ocurrencia de un evento sísmico.

Para su realización, el trabajo fue dividido en dos fases. La primera se basó en la recopilación de estudios previos y un rápido análisis de los datos aportados por estos, siendo el realizado por Cid (1999) el pilar fundamental de esta fase. Cid (1999) propuso la primera zonificación de la ciudad basada en datos geotécnicos, simulaciones numéricas y medidas de H/V. También se utilizó como referencia el estudio realizado por Alfaro et al. (2001), en el que obtuvo la frecuencia fundamental del suelo de la ciudad de Barcelona basado en la técnica de H/V.

La segunda fase consistió en la realización de una campaña de adquisición de señales de ruido locales empleando las técnicas de H/V, arrays y el método activo MASW (Multichannel Análisis Of Surface Waves). Una vez procesadas las señales registradas durante la campaña de campo, se determinó la frecuencia fundamental del suelo y la velocidad de las ondas de corte en la ciudad de Barcelona.

La aplicación de la técnica de H/V fue llevada a cabo utilizando sensores Lennartz 3 Componentes (0.2 Hz). Se registró el ruido en, al menos, dos puntos para cada array, esto con el fin de validar la hipótesis de horizontalidad de los estratos necesaria para el análisis de los datos. La duración de grabación de cada registro fue de 20 min. Los resultados de frecuencia fundamental presentados por Alfaro et al. (2001) se combinaron junto con los resultados obtenidos en este estudio, generándose así el mapa de frecuencia fundamental de Barcelona, el cual se muestra en la figura 3.6.

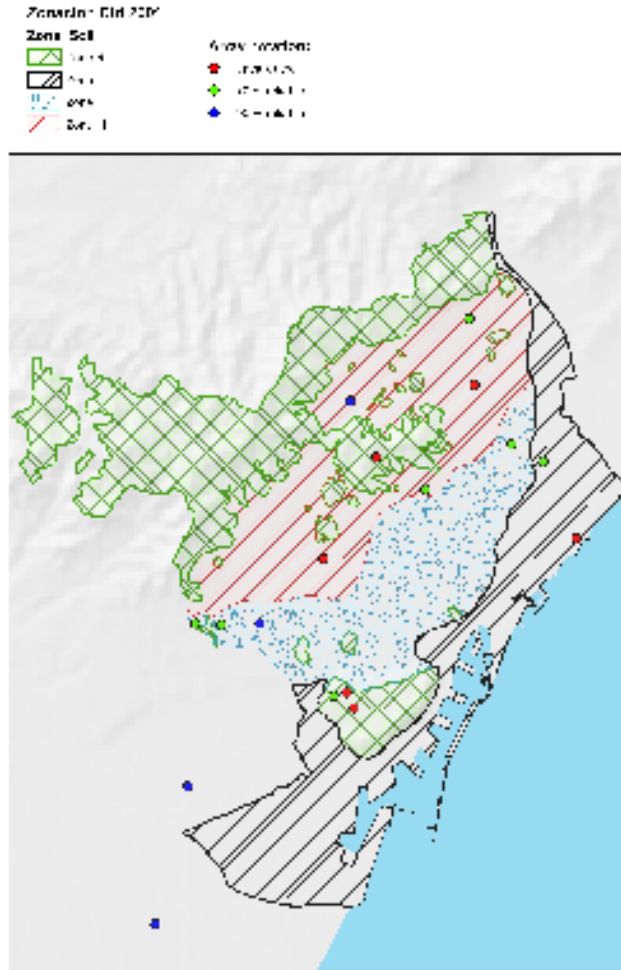


*Figura 3.6. Mapa de frecuencia fundamental de la ciudad de Barcelona (tomado de Héloïse, 2008).*

Para realizar los arrays se utilizaron once sensores Mark L4C, 1 Hz que se colocaron en dos círculos concéntricos. Hubo emplazamientos en los que se dificultó considerablemente el empleo de esta técnica debido a la densidad de las edificaciones presentes en el área.

Para el método activo MASW se aplicó una geometría lineal en la que se emplearon diez sensores Mark L4C, 1 Hz equidistantes cada diez metros. Se realizaron cinco disparos con una mandarina en cinco ubicaciones diferentes, cuatro de las cuales estaban distribuidas en ambos extremos del array y una quinta ubicada entre los sensores cinco y seis del mismo array.

Los resultados finales de los valores de velocidad de la onda de corte fueron tabulados, diferenciándose los distintos valores obtenidos para diferentes profundidades. Luego se evaluó cada zona en función a criterios previamente fijados. Dentro de estos criterios se encuentra el cumplimiento de la horizontalidad de los estratos, la relación entre los resultados obtenidos a través de los arrays y la información geológica, la relación existente entre los valores de velocidad obtenidos por el método FK y el SPAC, entre otros. El resultado final de la evaluación fue dividido en tres grupos, clasificándolos como no fiables para aquellos valores de evaluación menores a 6.5, fiables cuando se encontraban entre 6.5 y 7.5 y altamente fiables cuando eran mayores a 7.5. En la figura 3.7 se muestra la localización de las zonas de acuerdo al nivel de fiabilidad de los resultados obtenidos.



*Figura 3.7. Localización de las diferentes zonas en función al grado de fiabilidad de los resultados obtenidos (tomado de Héloïse, 2008).*

Finalmente, los valores de velocidad de la onda de corte y de la frecuencia de resonancia compilados en este trabajo fueron correlacionados de acuerdo a zonas ya establecidas y propuestas por Cid (1999). Se observó coherencia entre estas zonas, ya que para dos de las zonas planteadas la velocidad de la onda de corte es la misma en las capas superficiales, lo que sugiere que los sedimentos presentes en ambas son los mismos, a pesar de que el basamento se encuentra más somero en una de estas dos zonas. También se observan diferentes valores de velocidad de onda de corte entre dos zonas, pero con el mismo valor de frecuencia fundamental del suelo, lo que corresponde a una misma ubicación del basamento.

---

## **CAPÍTULO 4**

### **CAMPAÑA DE CAMPO. MEDICIÓN DE RUIDO SÍSMICO**

---





#### **4.1 Medición de ruido sísmico para la aplicación del método de H/V en el Valle de Arán.**

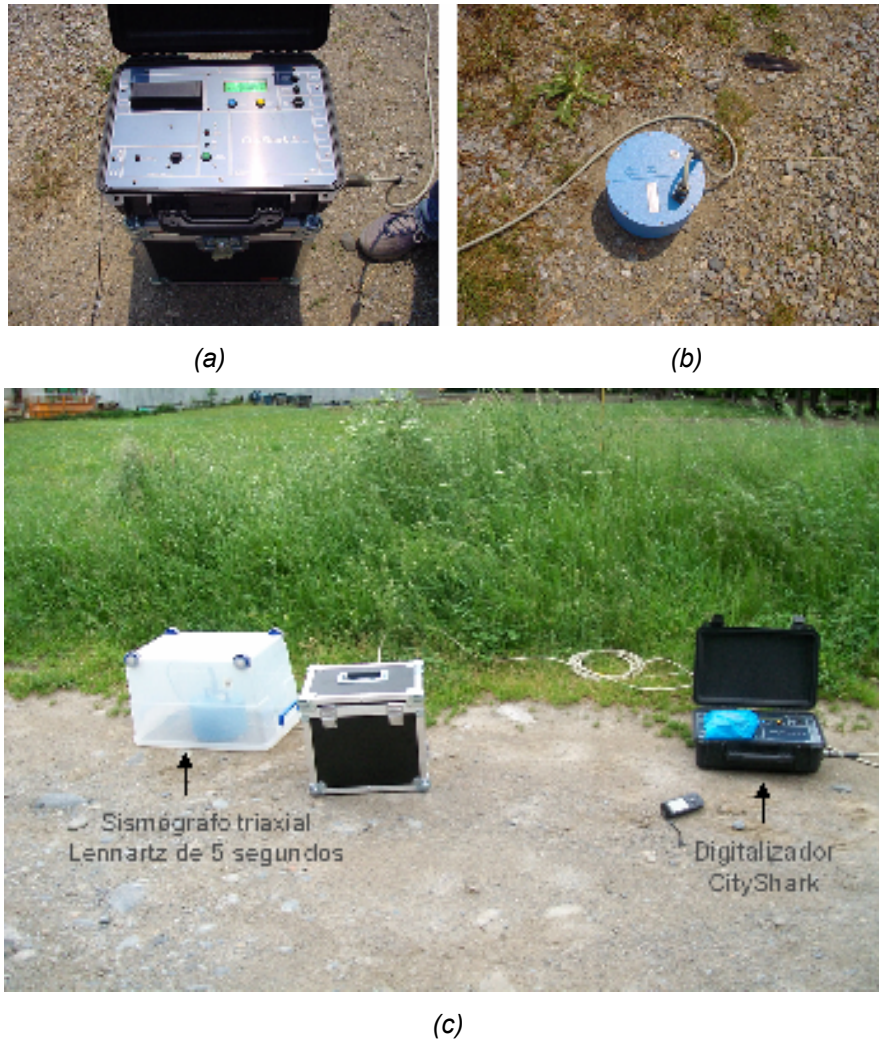
Los días 21 y 22 de Abril de 2010, se realizó una visita a la zona en estudio con el fin de llevar a cabo un reconocimiento de la misma y establecer los emplazamientos más idóneos para la realización de las medidas de ruido sísmico. Las características que se consideraron al momento de seleccionar los emplazamientos más idóneos fueron: áreas con poco tránsito, ya sea vehicular o peatonal, de fácil acceso o sin acceso restringido, zonas donde no se observara el afloramiento de formaciones rocosas. Se descartaron emplazamientos cercanos a fábricas, vías principales, e incluso en terrenos de gran pendiente debido a la dificultad que se podía presentar en el momento de nivelar los sensores. Las localidades seleccionadas para la realización del presente trabajo fueron las poblaciones de Les, Bossòst, Vielha y Arties, todas ellas pertenecientes a la comarca del Valle de Arán.

Las mediciones se realizaron entre el lunes 31 de Mayo y el viernes 04 de Junio de 2010 en cuatro de las principales poblaciones del Valle de Arán, siendo la más importante Vielha, su capital. En total, se realizaron 85 registros, de los cuales 73 se realizaron con un solo sensor y 12 fueron realizados empleando 2 sensores simultáneamente, separados entre sí a una distancia aproximada de 50 metros.

Durante la campaña de medidas de ruido sísmico en el Valle de Arán se utilizó un digitalizador CityShark de la casa Leas (figura 4.1 (a)) y un sismógrafo triaxial Lennartz de 5 segundos (figura 4.1 (b)). La duración de las ventanas de tiempo de cada registro fue de 10 minutos. A lo largo de toda la campaña de adquisición se utilizaron diferentes valores de ganancias, el cual se encontró entre 256 y 2048. Esto con el fin de obtener la máxima resolución en cada emplazamiento sin llegar a la saturación.

En términos generales, la zona en estudio se caracterizó por la presencia de viento. Para evitar el efecto que pudiese tener el viento sobre los sensores, estos se taparon con cubetas de plástico. En emplazamientos donde el viento era más fuerte, se colocó sobre la cubeta algún objeto pesado con el fin de evitar su movimiento e interferencia durante la medición. Con esta medida se pudo evitar la saturación de los sensores debido a la influencia externa del viento. En la figura 4.1 (c) se muestra un

ejemplo de la configuración del equipo utilizado durante la realización de la campaña de medición de ruido sísmico para la aplicación del método del cociente espectral H/V.



*Figura 4.1 (a) Digitalizador CityShark de la casa Leas. (b) Sismógrafo triaxial Lennartz de 5 segundos. (c) Configuración del equipo utilizado.*

Las mediciones fueron realizadas sobre asfalto, aceras o directamente sobre el suelo, todo en función de las características presentes en el emplazamiento sobre el cual se estarían realizando dichas medidas.

En la tabla 4.1 se muestra la distribución de los registros en cada una de las poblaciones estudiadas, mientras que en la tabla 4.2 se indica el nombre del emplazamiento, el cual que fue asignado en función al orden en que se realizaban las

medidas, el nombre del archivo en que se guardo cada registro, las coordenadas correspondientes y el valor de ganancia aplicado. Los emplazamientos en los que se observan dos valores de longitud y latitud corresponden a emplazamientos en los que se registraron dos medidas de ruido sísmico. En tablas siguientes se utilizará en sufijo C1 y C2, de acuerdo sea caso, para hacer referencia a la medida registrada por el sismógrafo triaxial conectado al primer o segundo canal del digitalizador.

Tabla 4.1. Distribución de registros en las poblaciones del Valle de Arán estudiadas.

Población	Nº de registros
Les	23
Bossòst	15
Vielha	40
Arties	7

Tabla 4.2. Descripción de los emplazamientos estudiados

Emplazamiento	Archivo	Longitud (x)	Latitud (y)	Ganancia
<b>LES</b>				
1	153	313702	4743677	1024
2	154	313968	4743893	2048
3	155	313592	4743590	1024
4	156	313429	4743440	1024
5 C1	157	313091	4743485	256
5 C2	034	313136	4743425	512
6	158	313277	4743327	512
7	159	313234	4743393	1024
8	160	313392	4743318	1024
9	043	313572	4743137	1024
10	162	313255	4743194	1024
11	163	313137	4742991	1024
12	164	313069	4742800	512
13	165	313039	4742632	512
14	166	312922	4742439	512
15	168	312847	4742274	512
16	169	312734	4742157	512
17	170	312992	4742475	512
18	044	312853	4742487	256
19	172	312828	4742496	512
20	173	312770	4742513	512
21	174	312723	4742528	512
86	027	312670	4742157	256
87	028	312636	4742190	256

BOSSÒST				
22	175	311776	4739571	1024
23	031	311649	4739619	1024
24 C1	177	311487	4739666	512
24 C2	177	311541	4739644	512
25	033	311391	4739645	256
26	179	311333	4739677	1024
27	180	311224	4739683	1024
28	181	311516	4740084	512
29	182	311432	4739994	1024
30	183	311365	4739907	1024
31	184	311306	4739778	1024
32	185	311241	4739702	1024
33	186	311215	4739528	1024
34	187	311160	4739399	512
84	029	311534	4739696	512
85 C1	030	311521	4739751	512
85 C2	030	311576	4739733	512
VIELHA				
35 C1	188	319746	4731120	512
35 C2	188	319693	4731137	512
36	189	319638	4731157	256
37 C1	190	319470	4730740	512
37 C2	190	319531	4730733	512
38	192	319615	4730672	1024
39	193	319572	4730549	1024
40	194	319509	4730489	1024
41	195	319465	4730431	1024
42 C1	196	319425	4730110	512
42 C2	196	319390	4730057	512
43	197	319378	4730209	512
44	198	319435	4730220	1024
45	199	319382	4730194	1024
46	200	319466	4730267	1024
47	201	319405	4730310	1024
48	202	319563	4730328	1024
49	203	319993	4730440	2048
50	204	320163	4730312	2048
52	206	319904	4730427	1024
53	207	319907	4730369	512
54	208	320176	4730142	512
55 C1	209	320096	4729982	256
55 C2	209	320107	4730042	256
56	210	320062	4729907	512
57	211	319523	4731192	512
58	212	319652	4730397	512
59	213	319750	4730506	512
60 C1	214	319796	4730241	512

60 C2	214	319769	4730217	512
61	215	319727	4730174	512
62 C1	216	319674	4730109	512
62 C2	216	319629	4730071	512
63	217	320250	4730072	1024
64 C1	218	320092	4730057	512
64 C2	218	320032	4730087	512
65 C1	219	319983	4730111	512
65 C2	219	319939	4730141	512
66 C1	220	319883	4730168	512
66 C2	220	319843	4730200	512
67 C1	221	319730	4730305	512
67 C2	221	319708	4730353	512
68	222	319299	4730454	512
69	223	319277	4730639	256
70	224	319240	4730742	512
71	003	319311	4730744	512
80	012	319598	4731382	512
81	013	319622	4731249	256
82	014	319582	4731033	256
83	015	319577	4730911	256
<b>ARTIES</b>				
72	004	325833	4729390	512
73	005	325721	4729527	1024
74	006	325757	4729670	1024
75	007	325771	4729731	1024
76	008	325799	4729831	1024
77	009	325828	4729908	1024
78	010	325860	4729968	1024

## 4.2. Mediciones de ruido sísmico en las localidades seleccionadas

A continuación se realiza una breve descripción de las cuatro poblaciones en las que se realizaron campañas de medición del ruido sísmico para luego hacer una reseña de como se llevó a cabo dicha campaña

### 4.2.1. Población de Les

La capital municipal de Les se caracteriza porque tiene un núcleo antiguo a la derecha del río Garona, mientras que a la ribera izquierda se encuentra el núcleo moderno. Ambos núcleos se encuentran unidos por el puente de Era Lana. El municipio, de 23.29 km<sup>2</sup>, se encuentra situado en la parte más baja del Valle de Arán, entre los



municipios Bossòst, al sur, y Baseun y Canejan, al norte. Les está ubicado a una altura de 634 m, destacándose los picos Estiuera, de 2.016 m, Ponné, de 1.982 m y Tres Corets, con 1.947 m. El río de Antòni es la aportación más importante al Garona en este municipio.

Les fue la primera población en la que se tomaron registros. Como se muestra en la tabla 4.1, en esta población se tomaron medidas en 23 emplazamientos. En términos generales, la ganancia aplicada al digitalizador fue de 512, aunque hubo ciertos emplazamientos en los que, debido al poco ruido presente, la ganancia se pudo aumentar a 1024. Para emplazamientos con alto nivel de ruido se aplicó una ganancia de 256. En la figura 4.2 se representan en círculos de color azul la ubicación de los 23 emplazamientos en los que se realizó medida del ruido sísmico en la población de Les.

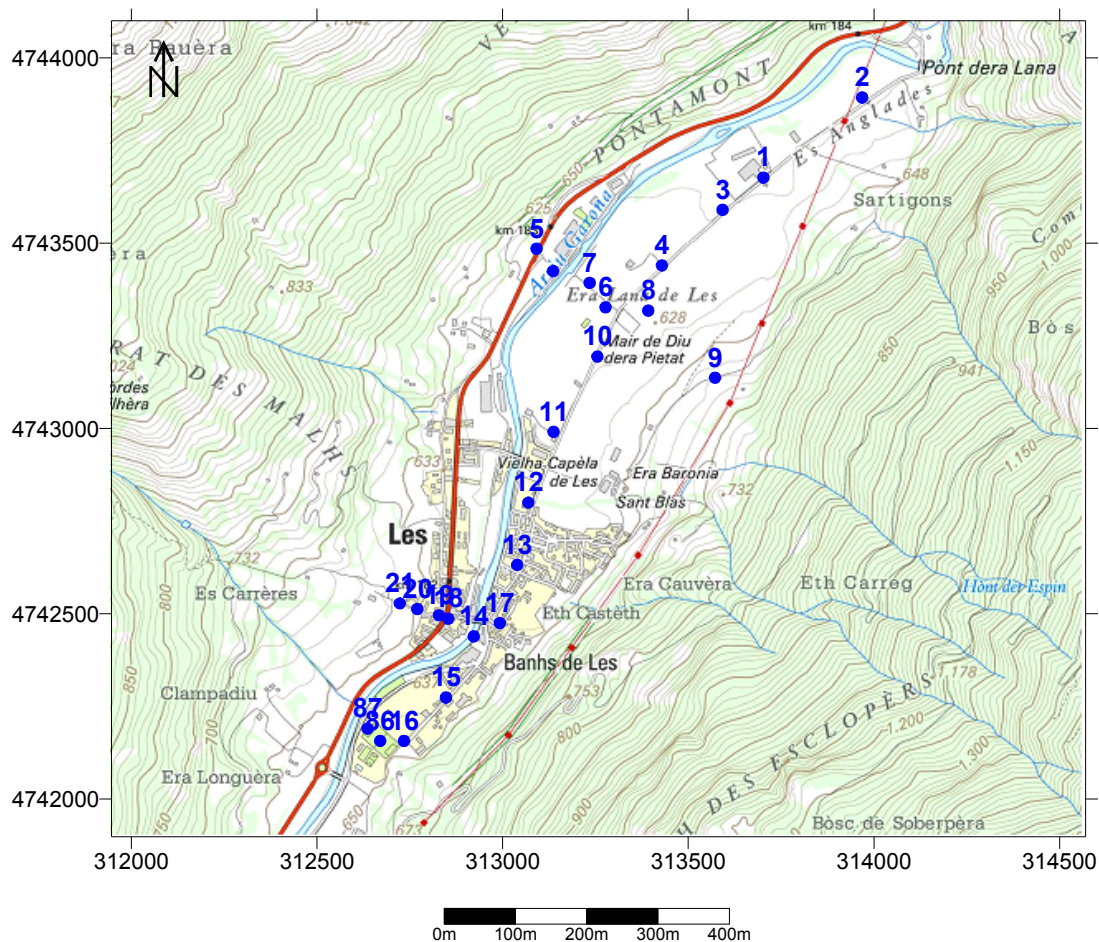


Figura 4.2. Mapa de la población de Les. Los puntos azules indican los emplazamientos donde se realizaron medidas de ruido ambiental (I.C.C., 2010).

#### 4.2.2. Población de Bossòst

El pueblo de Bossòst esta situado en la ribera izquierda del río Garona. Pertenece al municipio de Les y Arres y tiene una extensión de 28,15 km<sup>2</sup>. Bossòst se encuentra a una altura de 710 m. Dentro de esta zona destaca el pico de Aubàs, de 2.061 m.

Fue la población de Bossòst la siguiente localidad del Valle de Arán en la que se realizaron medidas del ruido sísmico. En este caso se tomaron 15 medidas con las que se buscaba abarcar gran parte de la población. En la Figura 4.3 se muestra en puntos de color azul, la ubicación de los emplazamientos donde se realizaron las medidas en Bossòst. Debido al bajo ruido presente en la zona, para el grueso de los registros se utilizó una ganancia de 1024. Sin embargo, dicho valor tuvo que reducirse a 512 en aquellos emplazamientos donde la presencia de ruido sísmico era mayor.

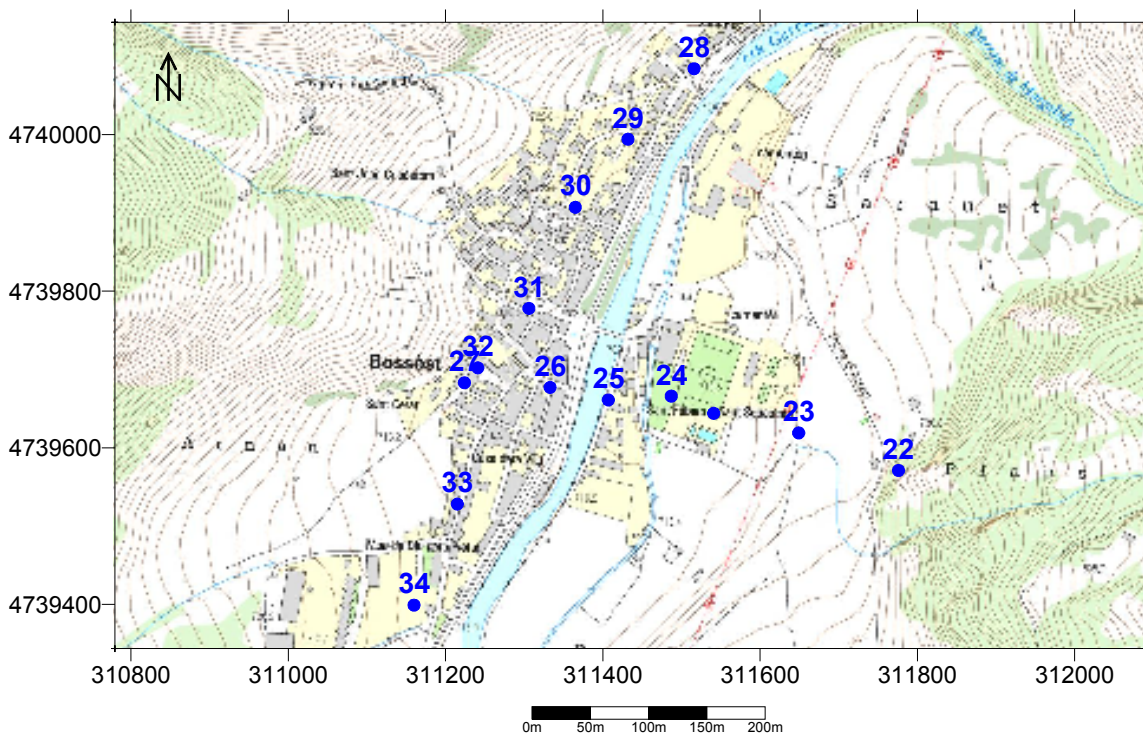


Figura 4.3. Mapa de la población de Bossòst. Los puntos azules indican los emplazamientos donde se realizaron medidas de ruido ambiental (I.G.C., 2010).



#### **4.2.3. Población de Vielha**

El municipio de Vielha tiene una extensión de 205.7 km<sup>2</sup>. Vielha esta situada a ambos lados del río Nere, cerca de la confluencia de este río con el Garona. Vielha, capital del Valle de Arán, se encuentra situada a una altura de 974 m, siendo el pico Molieres, de la sierra de Era Gerbosa, con 3.010 m, el de máxima altura en el municipio.

Vielha fue la tercera población en ser estudiada. Debido a que esta es la localidad con mayor población, se realizó una campaña de campo mucho más detallada, con una mayor densidad de emplazamientos en los que se realizaron mediciones de ruido sísmico. La distribución de estos emplazamientos se muestra en la Figura 4.4.

En el área de Vielha, en total, se realizaron 40 medidas de ruido sísmico. De estos 40 registros, 10 fueron tomados utilizando 2 sismógrafos triaxiales Lennartz simultáneamente, mientras que el resto de los registro se realizó empleando un único sensor. En total se tomaron medidas de ruido sísmico en 50 emplazamientos.

Debido a la variabilidad de ruido presente en los diversos emplazamientos sobre los cuales se realizaron medidas de ruido sísmico en la localidad de Vielha, no se puede hablar de un valor de ganancia dominante durante la campaña. Sin embargo el grueso de los registros se realizó con una ganancia que variaba entre 512 y 1024. En pocos emplazamientos que presentaban alto nivel de ruido sísmico, dicho valor se vio disminuido a 256. Hubo dos emplazamientos que no presentaron ruido sísmico significativo. Estos emplazamientos corresponden a los registros 49 y 50, ambos ubicados sobre la ladera de una de las montañas que bordean la población de Vielha. Debido al poco ruido sísmico presente en esa zona, el valor de ganancia aplicado fue de 2048.

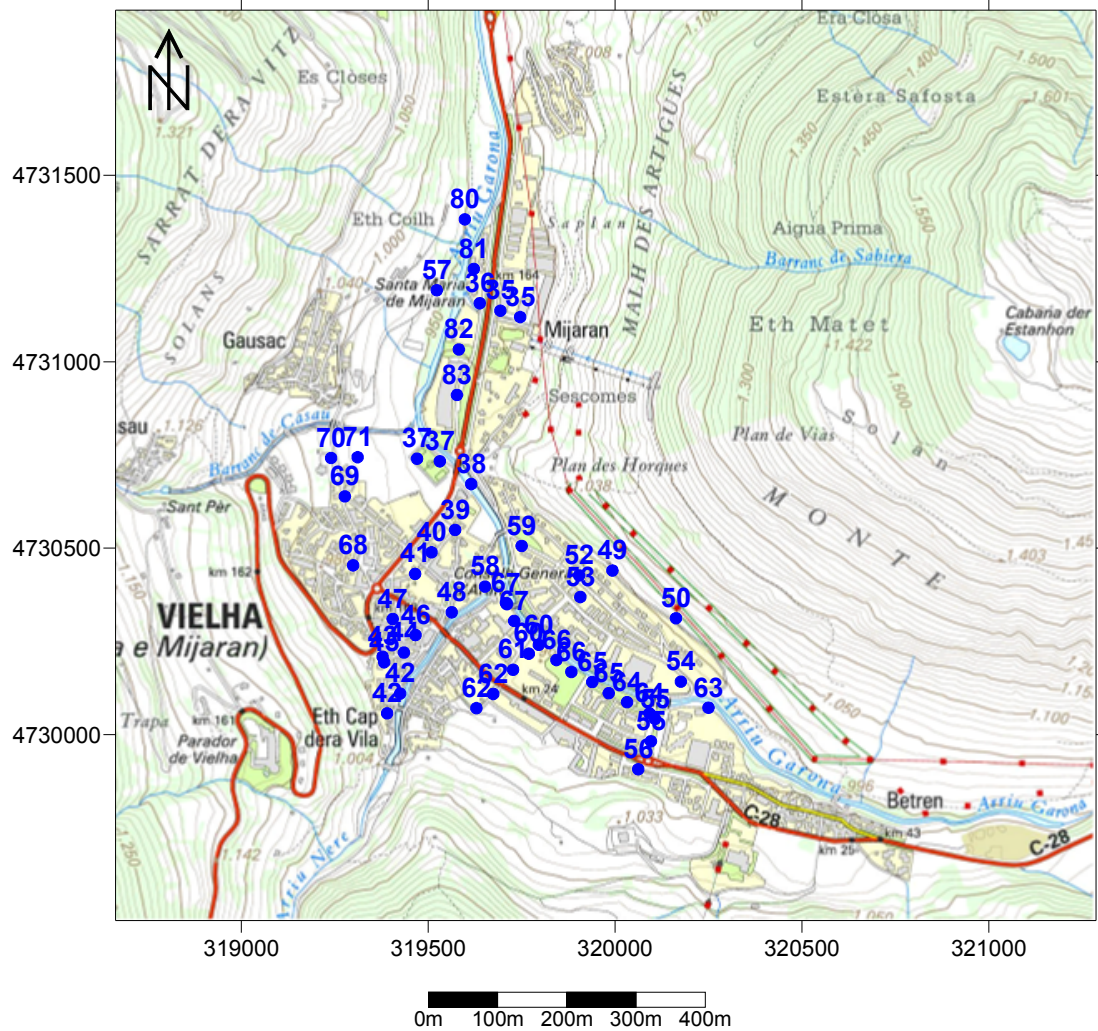


Figura 4.4. Mapa de la población de Vielha. Los puntos azules indican los emplazamientos donde se realizaron medidas de ruido ambiental (I.C.C. 2010).

#### 4.2.4. Población de Arties

La población de Arties, desde 1968, junto a las poblaciones de Bagergue, Gessa y Tredòs, pasa a formar parte de del municipio Naut Arán, el cual tiene un extensión total de 248.9 km<sup>2</sup>, lo que lo hace el municipio más grande de toda la comarca

Esta población fue la última localidad donde se realizaron medidas de ruido sísmico durante la campaña de adquisición. En total se tomaron 7 registros, los cuales se encuentran representados en la Figura 4.5. De los 7 registros, 6 se realizaron con

54

---

## **CAPÍTULO 5**

### **PROCESADO. DETERMINACIÓN DE LA FRECUENCIA FUNDAMENTAL DEL SUELO**

---



### 5.1. Procesado de las medidas de ruido sísmico

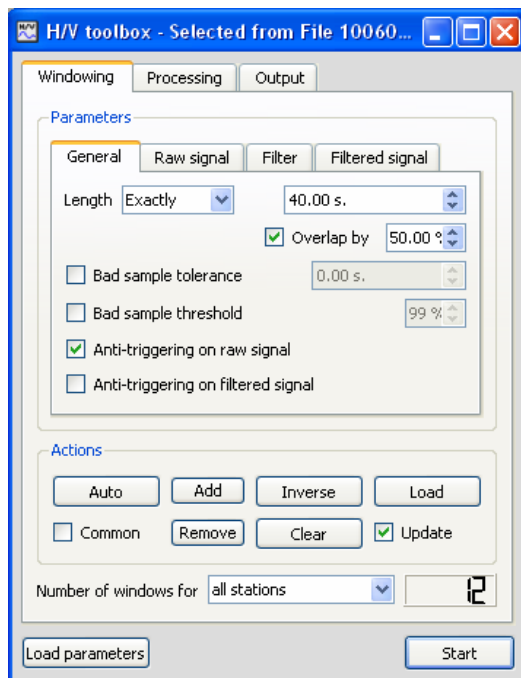
Una vez terminada la campaña de campo se realizó el procesado de los datos. Para ello se utilizó como herramienta principal el software GEOPSY, Geophysical Signal Database for Noise Array Processing, versión 2.6.3 (SESARRAY, 2010).

GEOPSY es un software que se basa en la técnica propuesta por Nakamura, (1989), la cual, como se explicó en el Capítulo 3, consiste en calcular el cociente entre los espectros de Fourier de las componentes horizontales y vertical de registro de ruido sísmico en superficie.

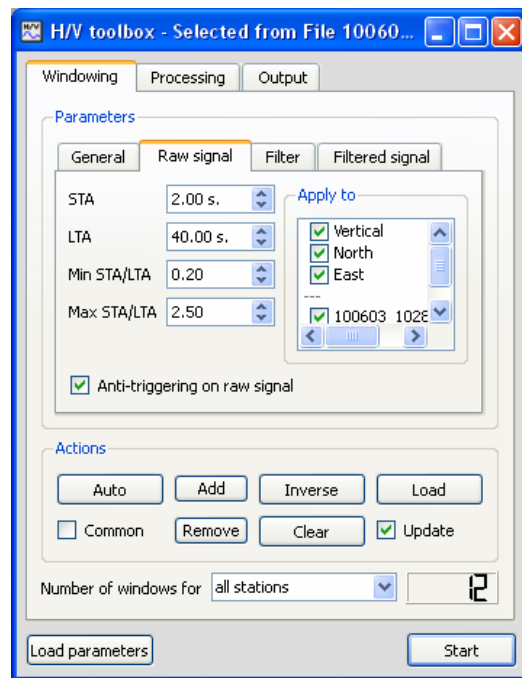
Para realizar el procesado de los datos, las señales fueron cargadas en función de cada zona estudiada. Una vez cargados los registros, se procedió al cálculo de la relación del cociente espectral H/V de cada uno. Durante el procesado hay que tomar en cuenta. Diversos parámetros

La figura 5.1 muestra la primera ventana del software de procesado de los datos. Los parámetros que han sido modificados durante el procesado de los datos pertenecen a la sección *General* y *Raw Signal*.

En la sección *General*, figura 5.1 (a), se puede observar que el primer parámetro a ser definido es el tamaño de las ventanas, *Length*, en las que se realizará el cálculo. Para el procesado de los registros correspondientes a este estudio, se trabajó con ventanas de longitud constante, siendo la longitud de 40 segundos la más empleada. También se activó la opción de *Overlap by*, la cual permite la superposición de las ventanas. Con ello se consigue obtener un mayor número de ventanas distribuidas a lo largo de la señal. Otra ventana que se activó en la sección *General*, fue la correspondiente a *Anti-triggering on raw signal*. Al activarse esta ventana, se aplica el anti-trigger muestra por muestra a todo lo largo de la señal, usando para ello el parámetro STA/LTA, el cual es definido más adelante, en la sección *Raw signal*.



(a)



(b)

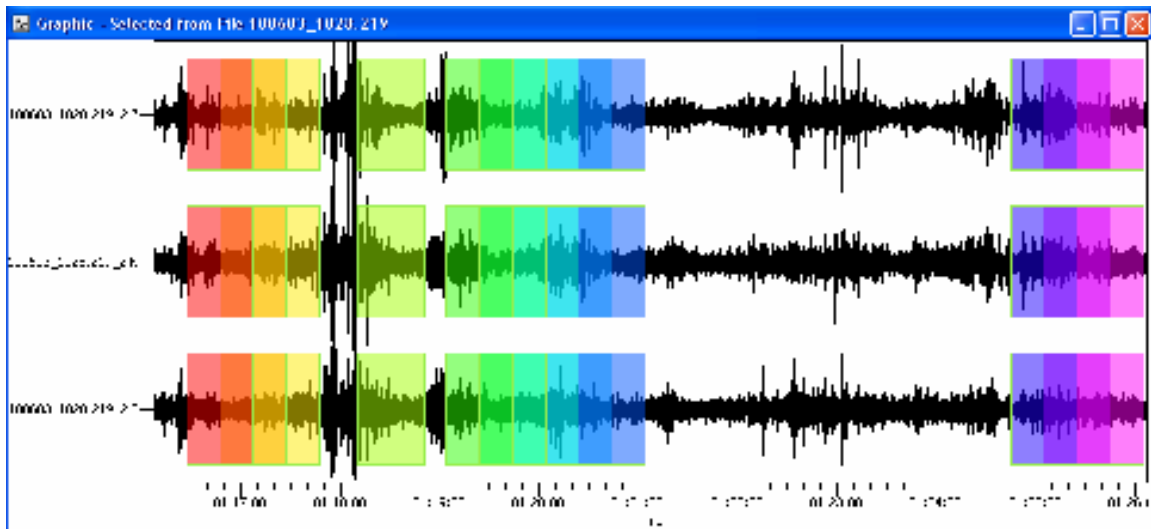
Figura 5.1. Ventanas de parámetros a ser definidos durante el procesamiento de los registros con el software GEOPSY.

Las opciones *Bad sample tolerance*, *bad sample threshold* y *Anti-triggering on filtered signal* no fueron activadas. Las dos primeras no fueron activadas ya que con ellas se introducen ciertas tolerancias que generan que el criterio de selección de las ventanas no sea tan estricto. La opción correspondiente a *Anti-triggering on filtered signal*, se activa cuando, previo al cálculo de la relación existente entre las componentes horizontal y vertical del espectro de amplitud de Fourier, se desea filtrar la señal usando los parámetros de STA/LTA correspondiente a la sección de *Filtered signal*.

Una vez definidos los parámetros correspondientes a la sección *General*, se procedió a definir la sección *Raw signal*. Como se muestra en la figura 5.1 (b), esta sección está dividida en dos partes. La primera permite definir los parámetros STA/LTA, mientras que la segunda parte permite seleccionar los archivos y las componentes a las que se les desea aplicar el *Anti-triggering on raw signal*.

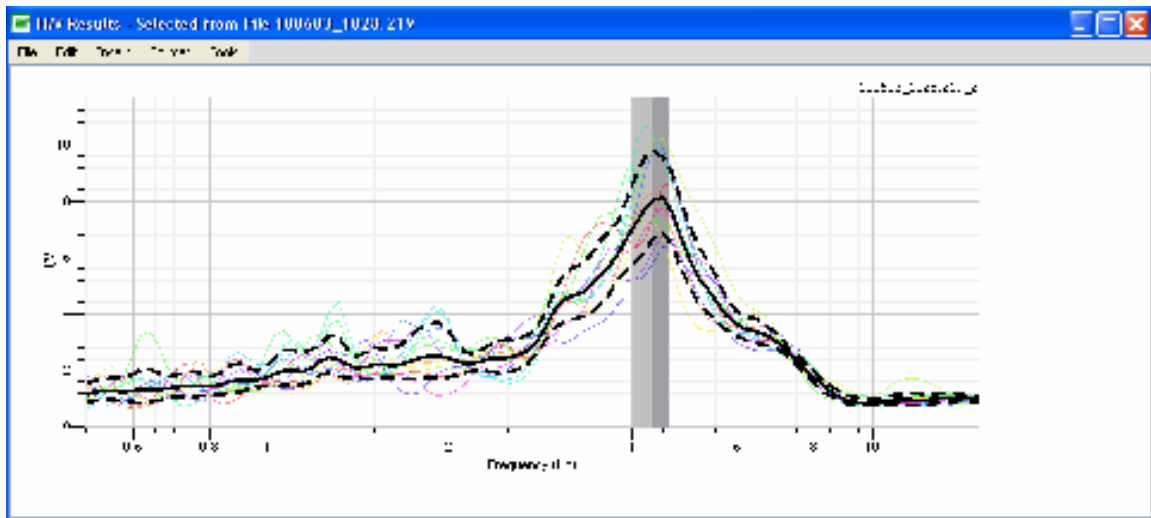
Una vez definidos todos los parámetros antes mencionados, el programa genera dos ventanas de resultados. En la primera (figura 5.2) se muestra la señal y la ubicación de las ventanas que cumplen con todos los parámetros previamente seleccionados. Como se observa en la figura 5.2, cada ventana posee un color característico. Como segundo resultado, el programa muestra la relación del cociente espectral H/V para cada una de las ventanas (figura 5.3). Cada curva va a tener el mismo color que el de la ventana correspondiente. A parte de las curvas de color, también se observan tres curvas en negro, una con línea continua, la cual refleja el promedio de todas las curvas generadas, y dos discontinuas, que definen el límite superior e inferior de la banda de error.

Como bien se ha explicado en capítulos anteriores, el interés del estudio se centra en ubicar el primer pico significativo en el cociente espectral H/V, ya que dicho valor coincide con el valor de frecuencia fundamental del suelo; siendo la curva de interés la trazada en línea negra continua. En la gráfica también se pueden observar dos franjas verticales de color gris. Con estas franjas, el programa identifica la posición de la frecuencia fundamental. La anchura de estas franjas indica el error en el valor de la frecuencia fundamental calculado. No siempre la franja se encuentra situada en el lugar exacto sin embargo, sirve de referencia para su ubicación.



*Figura 5.2. Ventanas del registro de ruido sísmico seleccionadas para el cálculo del cociente espectral H/V.*





*Figura 5.3. Curvas H/V generadas para cada una de las ventanas de trabajo. En color se representan los cocientes para cada ventana de cálculo, y en negro la media de todas las ventanas junto con la barra de error (en discontinuo).*

En curvas donde el pico no se encuentra bien definido se hace necesario modificar los parámetros introducidos al inicio del procesado. También se pueden eliminar, de forma manual, ciertas ventanas que se considera que introducen ruido indeseado dentro del registro. Para definir qué ventanas podrían ser eliminadas, solo basta con ubicar el color de la ventana que corresponde a la curva que se desee eliminar. Para ello se utilizan los comandos ubicados en la parte inferior de la ventana mostrada en la figura 5.1.

En el apéndice 1 se muestra el valor que fue asignado a cada registro en función de los parámetros previamente explicados. En la tabla 5.1 se muestra el valor de frecuencia determinado para cada registro.

Tabla 5.1. Valor de la frecuencia fundamental del suelo determinado en cada emplazamiento estudiado. Los emplazamientos cuya casilla de valor de frecuencia fundamental del suelo se encuentran rellenas en color gris corresponden a los emplazamientos en los que se observó una respuesta plana en la curva del cociente espectral H/V o donde el pico presentaba valores altos, ambas respuestas características de emplazamientos ubicados sobre roca o en áreas con poco espesor de sedimentos.

Punto	Valor frecuencia fundamental	Punto	Valor frecuencia fundamental	Punto	Valor frecuencia fundamental	Punto	Valor frecuencia fundamental
LES							
1	2.0	6	2.3	13	3.0	19	2.6
2	2.4	7	2.2	14	4.1	20	2.4
3	1.7	8	2.2	15	8.1	21	3.3
4	2.1	10	2.9	16	5.5		
5 C1	2.4	11	2.4	17	4.2		
5 C2	1.4	12	2.4	18	7.0		
BOSSOST							
22	7.7	26	2.6	29	3.6	32	4.8
24 C1	2.3	27	4.8	30	4.3	33	2.7
24 C2	2.3	28		31	5.3	34	2.7
25	1.6						
VIELHA							
35 C1	12.6	44		57		66 C1	4.3
35 C2	7.5	45		58	3.3	66 C2	3.9
36 C1	7.4	46	4.2	59	7.3	67 C1	3.3
36 C2	15.4	47	4.3	60 C1	3.7	67 C2	3.7
37 C1	4.1	48	3.7	60 C2	4.2	68	3.2
37 C2	4346.0	49		61	5.0	69	4.7
38	4.7	50		62 C1		70	4.1
39	3.4	52	7.8	62 C2	7.3	71	3.9
40	2.8	53	6.1	63		80	7.3
41	3.1	54		64 C1	7.3	81	
42		55 C1	7.8	64 C2	6.7	82	9.0
42 C1		55 C2	8.7	65 C1	4.7	83	8.5
43 C2		56		65 C2	4.5		
ARTIES							
72	7.0	74	2.8	76	2.8	78	2.8
73	6.6	75	2.8	77	2.8		

Una vez determinado y tabulado el valor de frecuencia fundamental correspondiente a cada registro, se generaron perfiles y mapas de contorno según fuese el caso. Para la generación de los perfiles se utilizaron como herramientas los software GEOPSY y Excel. Mientras que el software Surfer fue utilizado para realizar la representación sobre los planos de la ubicación y distribución de los perfiles y lo valores de frecuencia fundamental del suelo a lo largo de las cuatro poblaciones estudiadas.

## 5.2. Análisis y discusión de los resultados

### 5.2.1. Población de Les

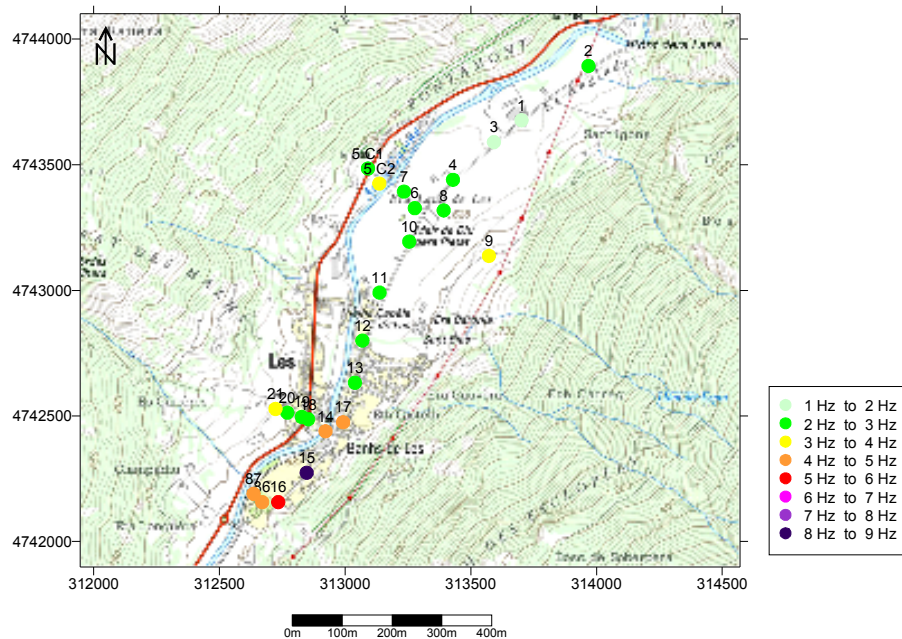
En la figura 5.4 se muestra una imagen en 3D, en sentido N-S de la población de Les. Pueden observarse las vertientes que generan el valle sobre el que se encuentra la población. En línea roja se representan los tres perfiles a ser estudiados en la zona y que serán definidos más adelante. Esta imagen permite tener una visión general de la ubicación de los perfiles en el valle y la proximidad a la que estos se encuentran de las laderas de las montañas que definen el valle.



*Figura 5.4. Imagen 3D de la vertiente N-S que conforma el valle sobre el que se encuentra ubicada la población de Les. En línea roja se muestra la ubicación aproximada de los emplazamientos estudiados.*

Los valores de la frecuencia fundamental del suelo determinados para cada uno de los emplazamientos estudiados en la población de Les fueron graficados con el fin de observar su distribución (figura 5.5). El mínimo valor de frecuencia fundamental medido corresponde al emplazamiento 3, con un valor de 1.7 Hz, mientras que el máximo corresponde al emplazamiento 15, con un valor de 8.1 Hz. En términos

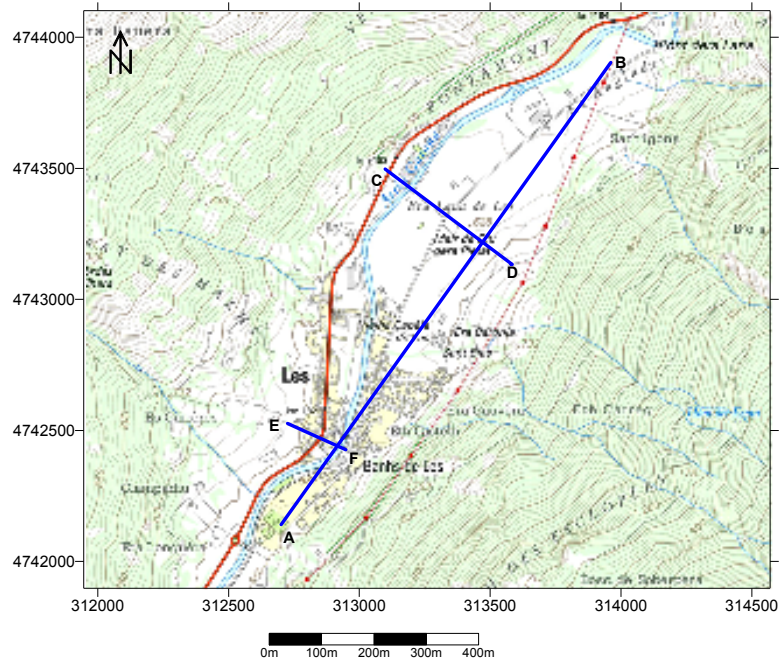
generales, en la figura 5.5 puede observarse como los menores valores de frecuencia fundamental se encuentran hacia el norte de la población de Les, lo que corresponde a la parte mas ancha de la cubeta que conforma al valle sobre el que se encuentra el poblado. Los mayores valores se registraron en el sector sur, área donde el valle comienza a estrecharse, habiendo una mayor proximidad entre las vertientes que lo generan. En esta zona se encuentra ubicado el núcleo urbano de la población de Les. El valor de frecuencia fundamental medido en dicho núcleo varía entre los 2.3 y 8.1 Hz. A grandes rasgos, el valor de frecuencia fundamental del suelo en la población de Les varía entre 1 y 5 Hz. Solo dos emplazamientos mostraron valores por encima de los 5 Hz. Estos emplazamientos se caracterizaron por ser los más cercanos a la ladera de la montaña más próxima. En la figura 5.5 no se observan emplazamientos ubicados sobre roca o suelos donde el espesor de los sedimentos es despreciable ya que los perfiles trazados, a pesar de estar cercanos a la ladera de las montañas próximas, no llegaron a ubicarse sobre zonas donde se evidenciara la presencia o proximidad del sustrato rocoso.



*Figura 5.5. Distribución del valor de frecuencia fundamental del suelo determinado para los emplazamientos estudiados en el poblado de Les.*

Para estudiar como es la variación de la frecuencia fundamental del suelo a lo largo y ancho de la cubeta que conforma al valle sobre el que se encuentra la población de Les, se analizaron tres perfiles. La figura 5.6 muestra de forma gráfica la ubicación

de los perfiles estudiados. En el perfil AB se evalúa la variación de la frecuencia fundamental del suelo a lo largo de toda la cubeta. Perpendicular al perfil AB y transversal al valle, se han trazado otros dos perfiles: CD y EF. El perfil CD se encuentra ubicado al norte de la población de Les. A pesar de ser una zona poco urbanizada, su estudio es de interés ya que corresponde al sector con mayor anchura de la cubeta. El perfil EF cruza el sector sur del poblado.

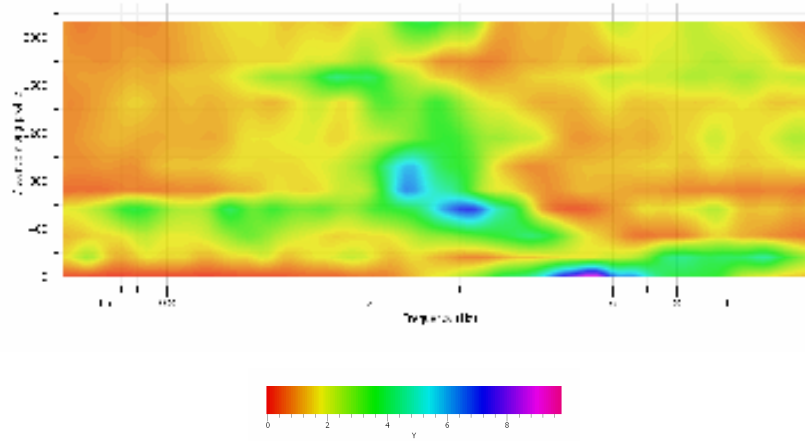


*Figura 5.6. Ubicación de los perfiles realizados en la población de Les.*

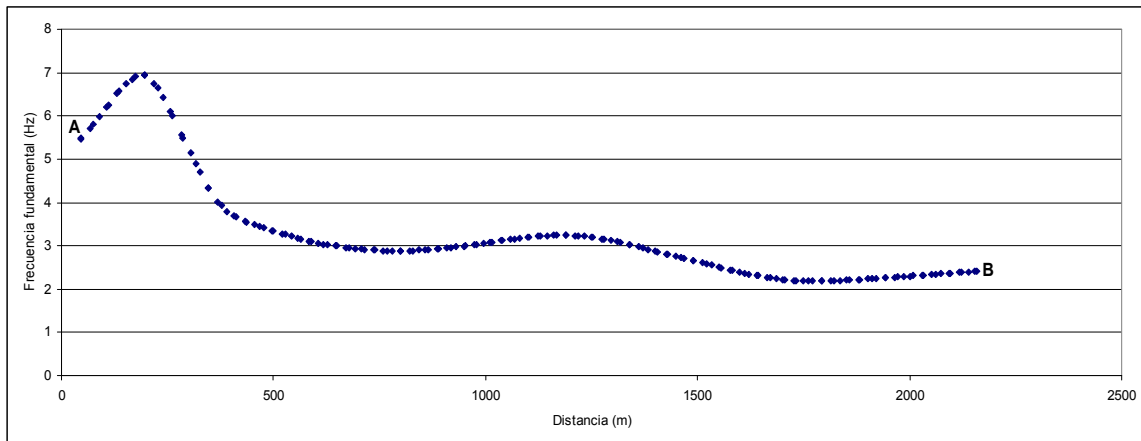
Los resultados obtenidos para el perfil AB se muestran en la figura 5.7 La imagen superior (a) muestra como es la distribución de los valores de frecuencia fundamental del suelo a lo largo del perfil AB, mientras que en la imagen inferior (b) se muestra de forma gráfica dicha distribución. Debido a que el valor de frecuencia fundamental del suelo se encuentra relacionado a la geometría de la cubeta que se está estudiando y al espesor de sedimentos presentes en la misma, el aumento en el valor de frecuencia fundamental observado a medida que se avanza a lo largo del perfil, dirección N-S, debe estar relacionada a una disminución en el espesor de sedientos. En el extremo A del perfil, correspondiente al extremo sur, se observan los mayores valores de frecuencia fundamental, resultado observado en la figura 5.5.

En la figura 5.8 se muestran los resultados obtenidos para el perfil CD. La imagen superior (a) muestra la distribución de los valores de frecuencia fundamental del

suelo a lo largo del perfil CD, mientras en que la imagen inferior (b) muestra de forma gráfica dicha distribución. En ambas imágenes se observa como la distribución del valor de la frecuencia fundamental del suelo obtenido a lo largo del perfil CD puede ser reflejo del tramo de la cubeta que dicho perfil atraviesa. Los menores valores de frecuencia fundamental corresponden al área donde se esperaría mayor espesor de sedimentos.



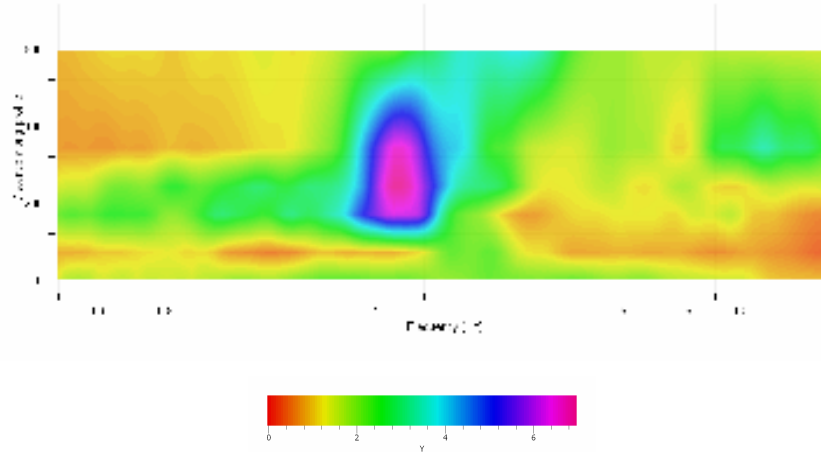
(a)



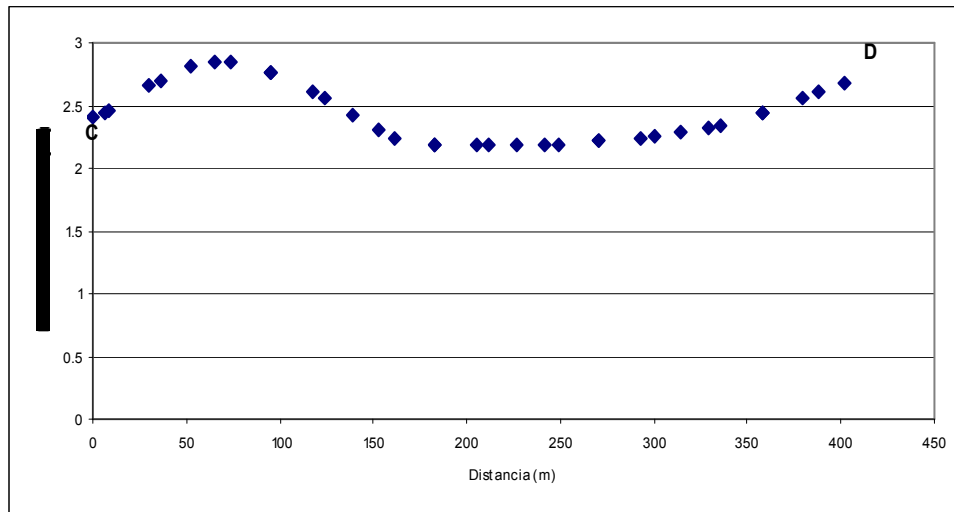
(b)

**Figura 5.7. Resultados obtenidos del perfil AB. (a) Distribución de la frecuencia fundamental a lo largo del perfil AB. (b) Representación gráfica de la distribución de la frecuencia fundamental a lo largo del perfil AB.**

En la imagen (b) de la figura 5.8, se puede observar una disminución en el valor de la frecuencia fundamental en el extremo C del perfil. Dicha disminución puede ser originada debido a la distancia a la que se encuentra el emplazamiento de la ladera más cercana.



(a)



(b)

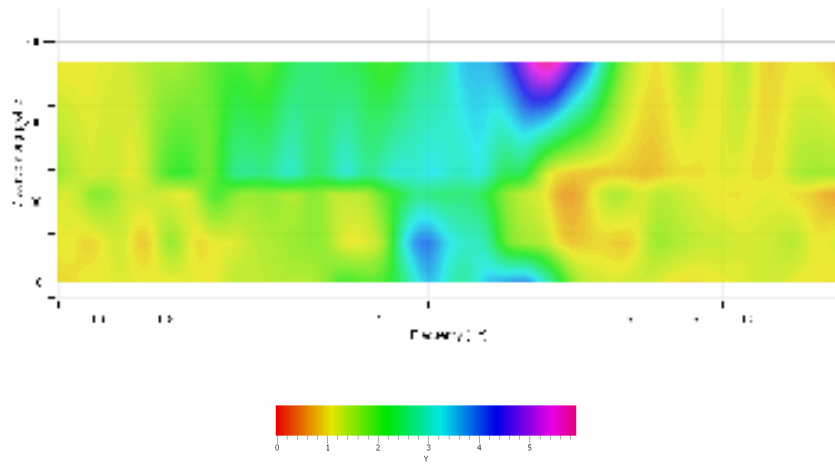
Figura 5.8. Resultados obtenidos del perfil AB. (a) Distribución de la frecuencia fundamental a lo largo del perfil CD. (b) Representación gráfica de la distribución de la frecuencia fundamental a lo largo del perfil CD.

Los resultados correspondientes al perfil EF se muestran en la figura 5.9. Ambas imágenes presentan como es la distribución del valor de frecuencia fundamental del suelo a lo largo del perfil EF. En ambos casos, se observa como los valores de frecuencia fundamental del suelo se encuentran ligados a la geometría de la cubeta en estudio y al espesor de sedimentos presentes en la misma. Los mayores valores de frecuencia fundamental registrados se encuentran en los extremos del perfil. En el extremo oeste del perfil (extremo E) se registro un valor de frecuencia fundamental de

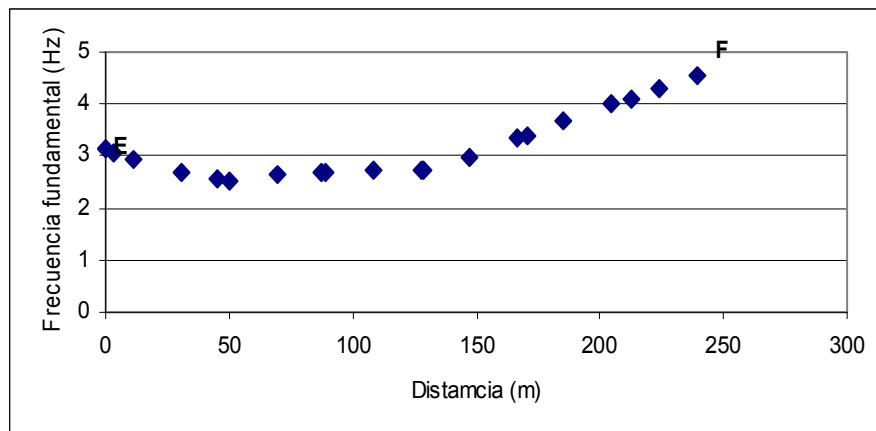


3.3 Hz, mientras que el extremo opuesto (extremo F), presentó un valor de 4.2 Hz. Los menores valores de frecuencia fundamental del suelo fueron registrados en el centro del perfil, lo que representa el centro de la cubeta y cuyo valor de frecuencia fundamental se encuentra al rededor de los 2.5 Hz.

En términos generales, se puede observar como el valor de la frecuencia fundamental del suelo en la población de Les disminuye de sur a norte, correspondiendo el sector norte a la zona más ancha del valle y cuyos valores de frecuencia fundamental registrados sugieren un mayor espesor de sedimentos que el que podría estar presente en el sector sur del valle.



(a)



(b)

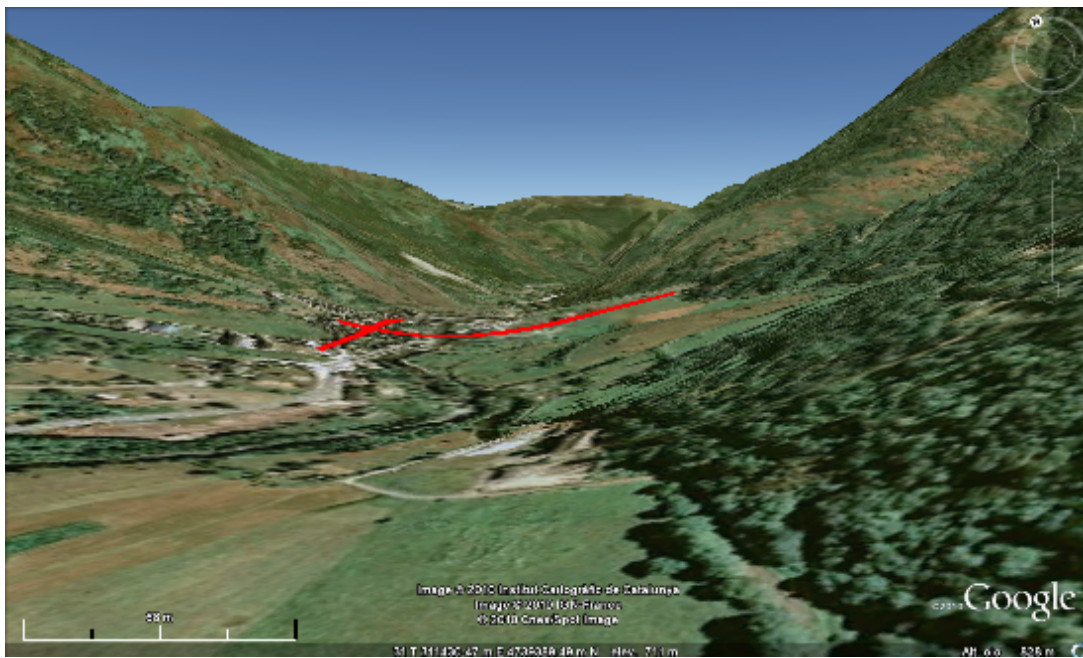
Figura 5.9. Resultados obtenidos del perfil AB. (a) Distribución de la frecuencia fundamental a lo largo del perfil EF. (b) Representación gráfica de la distribución de la frecuencia fundamental a lo largo del perfil EF.



### 5.2.2. Población de Bossòst.

En la tabla 5.1 se muestran los valores de la frecuencia fundamental del suelo determinados para los emplazamientos estudiados en la población de Bossòst. Puede observarse como este valor varía de 2.1 a 7.7 Hz.

La figura 5.10 muestra una imagen en 3D, en dirección N-S, del valle sobre el que se encuentra la población de Bossòst. En ella se puede observar la proximidad o lejanía a la que se encuentra cada uno de los emplazamientos estudiados de las laderas de las montañas. Dichos emplazamientos se encuentran representados por líneas rojas a partir de las cuales luego se definirán los dos perfiles a ser estudiados en el poblado de Bossòst. También se puede apreciar la pendiente que caracteriza a cada una de las laderas de las montañas que generan el valle, rasgo topográfico que influye directamente en la acumulación de sedimentos en determinada áreas.



*Figura 5.10. Imagen 3D de la vertiente N-S que conforma el valle sobre el que se encuentra ubicada la población de Bossòst. En línea roja se muestra la ubicación aproximada de los emplazamientos estudiados.*

En la figura 5.11 se observa la distribución del valor de la frecuencia fundamental correspondientes a cada emplazamiento, el mínimo valor medido en la población de Bossòst corresponde al registro 85, el cual presenta una frecuencia fundamental de 2.1

Hz. Dicho registro se encuentra ubicado en la parte central de la figura 5.11, a la derecha del río Garona. En esa zona puede observarse un valor relativamente constante de la frecuencia fundamental del suelo, ubicándose este entre los 2.1 y 2.7 Hz.

El mayor valor de frecuencia fundamental del suelo medido corresponde al emplazamiento 22, el cual se encuentra representado en la figura 5.11 con un círculo negro y cuyo valor de frecuencia fundamental fue de 7.7 Hz. Las curvas de nivel que definen la topografía de la zona sugieren que el emplazamiento 22 se encuentra ubicado en la ladera de la montaña. Su pronunciada pendiente se ve reflejada en la cercanía existente entre las curvas de nivel, lo que permite sugerir que el espesor de sedimentos en esa zona es mucho menor en comparación al que podría presentarse en el centro del valle, efecto que se manifiesta en el aumento del valor de frecuencia fundamental del suelo. Los emplazamientos ubicados en el área más urbanizada de Bossòst presentan valores de frecuencia fundamental intermedios, ubicados entre los 4 y 6 Hz.

Un único registro presentó respuesta plana en la curva H/V, respuesta característica de medidas de ruido sísmico realizadas sobre emplazamientos rocosos o con espesor de sedimentos poco significativo. Este registro corresponde al emplazamiento 28 ubicado al norte del valle donde se encuentra la población de Bossòst. El sector norte del valle se caracteriza por tener una mayor cercanía de las vertientes que lo generan.

Para el estudio de la variación longitudinal y transversal de la frecuencia fundamental del suelo presente en la población de Bossòst, se trazaron dos perfiles que se encuentran representados en la figura 5.12. El perfil AB, con dirección aproximada N-S y longitudinal al valle, atraviesa la zona más urbanizada en Bossòst. Con el perfil CD, con dirección aproximada E-W y transversal al valle, se busca estudiar la variación de la frecuencia fundamental del suelo a lo ancho de la cubeta donde se encuentra ubicada el poblado.

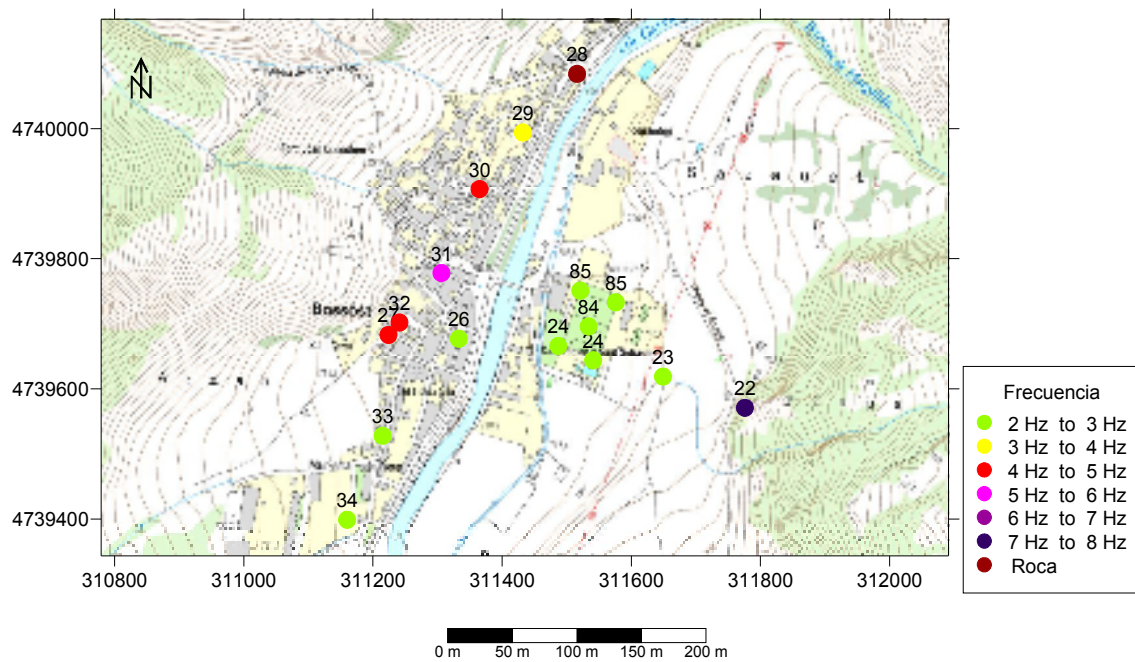


Figura 5.11. Distribución del valor de frecuencia fundamental del suelo determinado para los emplazamientos estudiados en Bossòst.

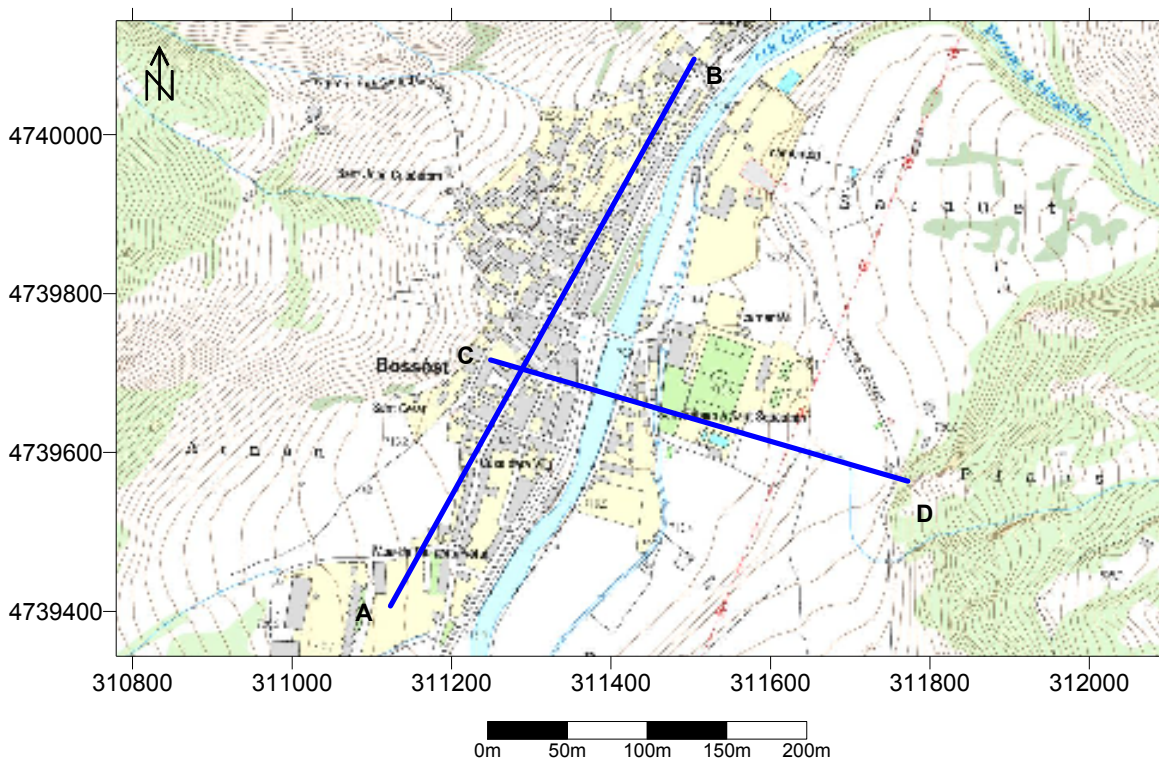
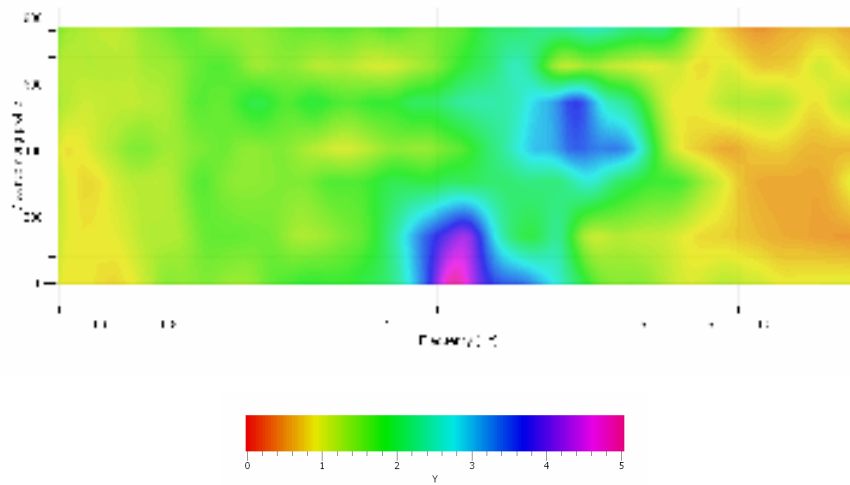
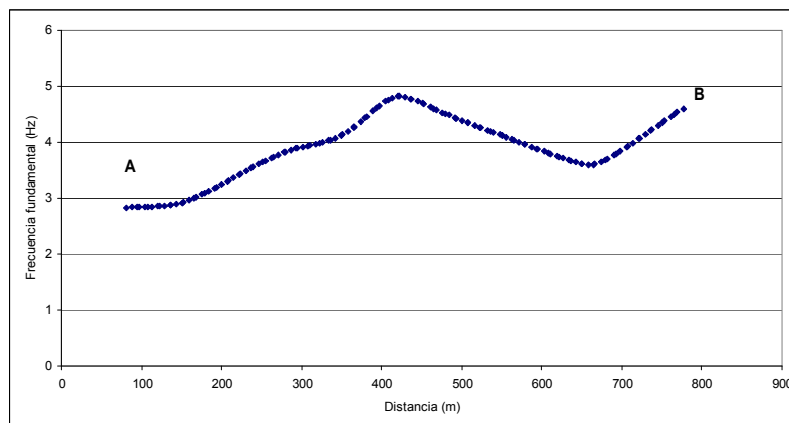


Figura 5.12. Ubicación de los perfiles realizados en la población de Bossòst.

La figura 5.13 presenta los resultados obtenidos para el perfil AB. La imagen superior (a) de esta figura muestra como es la distribución del valor de frecuencia fundamental a lo largo de perfil AB.



(a)



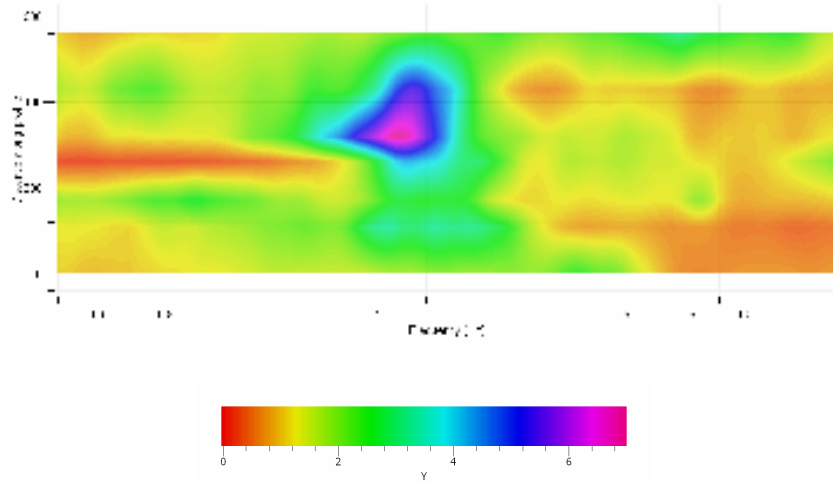
(b)

**Figura 5.13. Resultados obtenidos del perfil AB. (a) Distribución de la frecuencia fundamental a lo largo del perfil. (b) Representación gráfica de la distribución de la frecuencia fundamental a lo largo del perfil.**

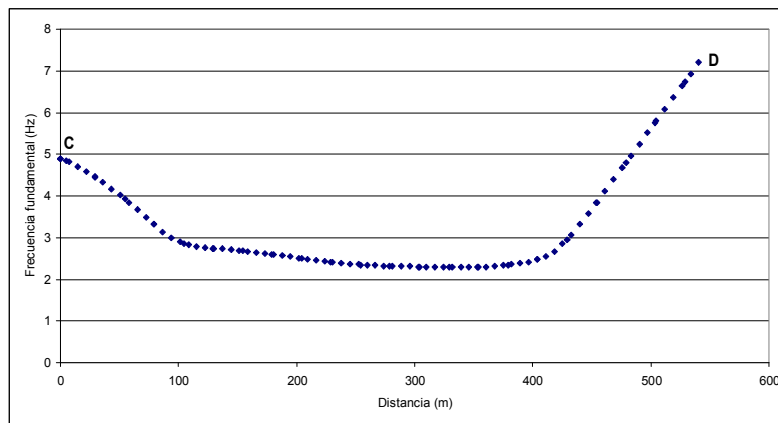
En la imagen inferior (b) de la figura 5.13 se representa en forma gráfica la distribución de frecuencia fundamental del suelo a lo largo del perfil AB. Se puede

observar que los menores valores de frecuencia fundamental se encuentran ubicados en el extremo sur del perfil, lo que sugiere la existencia de un mayor espesor de sedimentos en esta área. A medida que se va avanzado a lo largo del perfil, el valor de frecuencia fundamental aumenta hasta alcanzar un valor de 4.8 Hz, para luego comenzar a disminuir de nuevo hasta alcanzar un valor de 3.9 Hz correspondiente al emplazamiento 29. Esta variación en el valor de la frecuencia fundamental del suelo puede ser debido a la cercanía o lejanía a la que se encuentra el perfil de la ladera de la montaña más próxima. Los mayores valores se observan en emplazamientos próximos a la ladera mientras que, a medida que hay mayor distancia entre el emplazamiento y la ladera, se aprecia como los valores de frecuencia fundamental del suelo disminuyen.

En la figura 5.14 se observan los resultados correspondientes al perfil CD. Las imágenes (a) y (b) muestran la variación de la frecuencia fundamental del suelo a lo largo de todo el perfil CD. En ambas imágenes se puede observar como dicha variación puede estar describiendo la geometría de la cubeta sobre la que se encuentra la población de Bossòst. Los mayores valores de frecuencia fundamental presentes en el perfil se encuentran a ambos extremos del mismo y corresponden a emplazamientos ubicados cerca de la ladera de la montaña más próxima. Mientras que los menores se encuentran en su centro, lo que vendría representando al centro de la cubeta, cuyo valor de frecuencia fundamental se encuentra entre los 2 y 3 Hz.



(a)



(b)

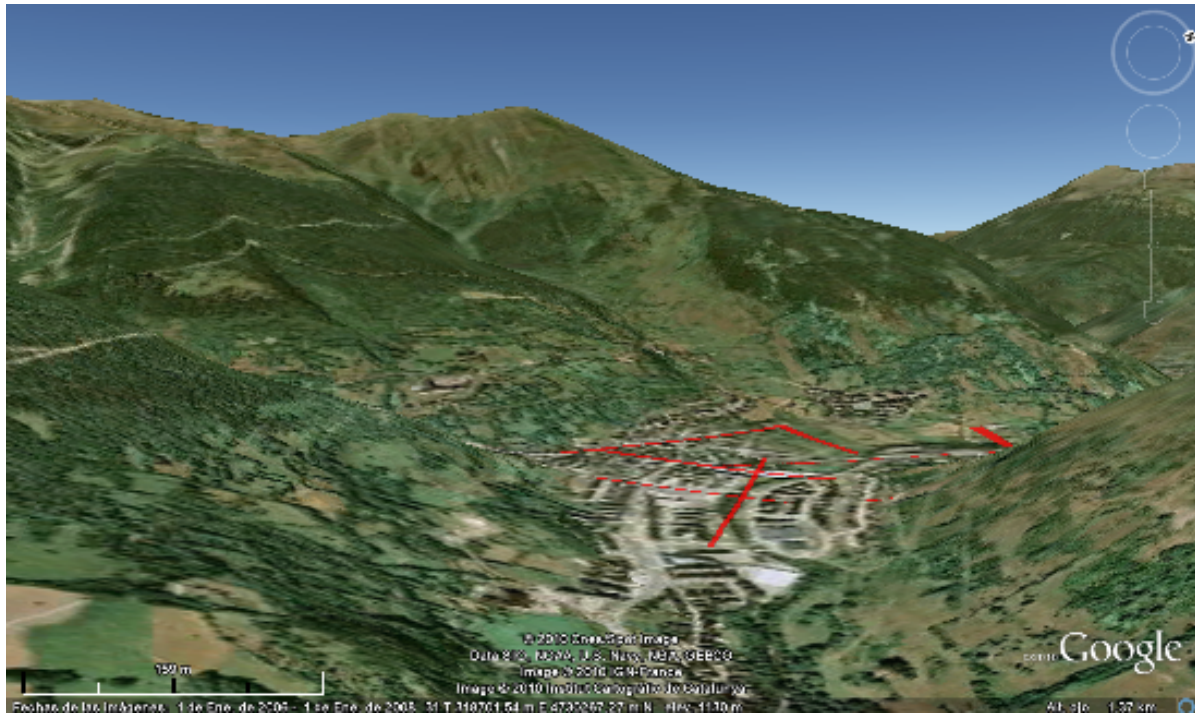
Figura 5.14. Resultados obtenidos del perfil CD. (a) Distribución de la frecuencia fundamental a lo largo del perfil. (b) Representación gráfica de la distribución de la frecuencia fundamental a lo largo del perfil.

### 5.2.3. Población de Vielha

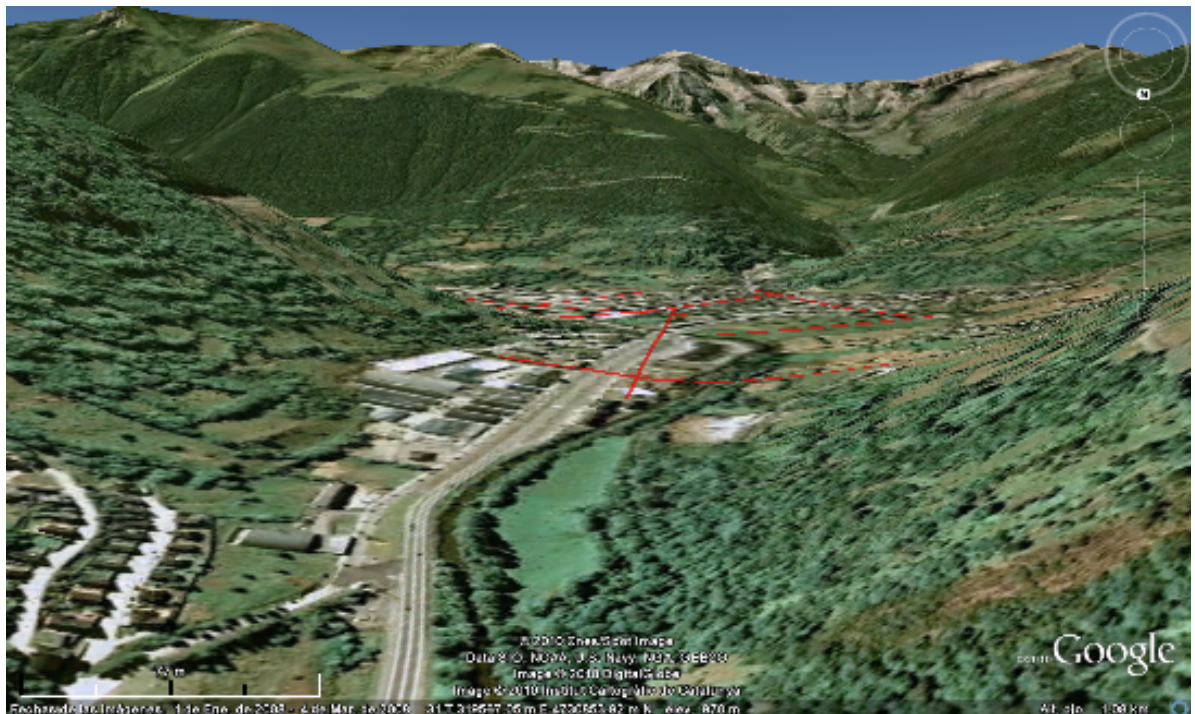
La población de Vielha se encuentra ubicada en el valle principal de la comarca del Valle de Arán. Las vertientes que delimitan a este valle poseen dos direcciones características. El sector sur de Vielha se encuentra delimitado por dos vertientes con sentido aproximado EW, mientras que el sentido de las vertientes que delimitan al sector norte es NS. En la figura 5.15 se presentan dos imágenes en 3D de Vielha. La imagen superior (a) corresponde al sector sur del valle, mientras que la imagen inferior (b) muestra una visión en sentido sur del sector norte del valle sobre el que se encuentra la población de Vielha. En ambas imágenes, puede observarse la topografía característica de la zona así como la pendiente y dirección de las vertientes que delimitan al valle. Las líneas rojas representan la ubicación de alguno de los emplazamientos en los que se realizaron medidas de ruido sísmico en la población de Vielha y a partir de los cuales, más adelante se definirán los perfiles a ser estudiados.

Como se indica en la tabla 4.1, en la población de Vielha se realizaron medidas de ruido sísmico en 40 emplazamientos. La distribución del valor de frecuencia fundamental del suelo determinado para cada emplazamiento se muestra en la gráfica 5.16. En términos generales, el valor de la frecuencia fundamental del suelo se encuentra entre los 2.8 y 9 Hz. El menor valor, de 2.8 Hz, corresponde al emplazamiento 40, ubicado en el núcleo urbano de la población de Vielha, mientras que el valor de 9 Hz le corresponde al emplazamiento 82, ubicado en el extremo norte del valle. Puede observarse como en el centro del valle se encuentran los emplazamientos que registraron menor valor de frecuencia, valor que va aumentando a medida que los emplazamientos se encuentran más cercanos a las laderas de la montaña. Los emplazamientos representados con un círculo de color marrón corresponden a aquellos que presentaron una respuesta plana en la curvas H/V generadas o bien cuyo pico en la curva H/V presentaba un valor de frecuencia fundamental característico de rocas o suelos con espesor de sedimentos poco significativo. Puede observarse que estos emplazamientos se caracterizan por estar muy próximos a la ladera de las montañas.





(a)



(b)

Figura 5.15. Imagen 3D de las vertientes que conforma el valle sobre el que se encuentra ubicada la población de Vielha. (a) Vertiente EW. (b) Vertientes NS. En línea roja se muestra la ubicación aproximada de algunos los emplazamientos estudiados.



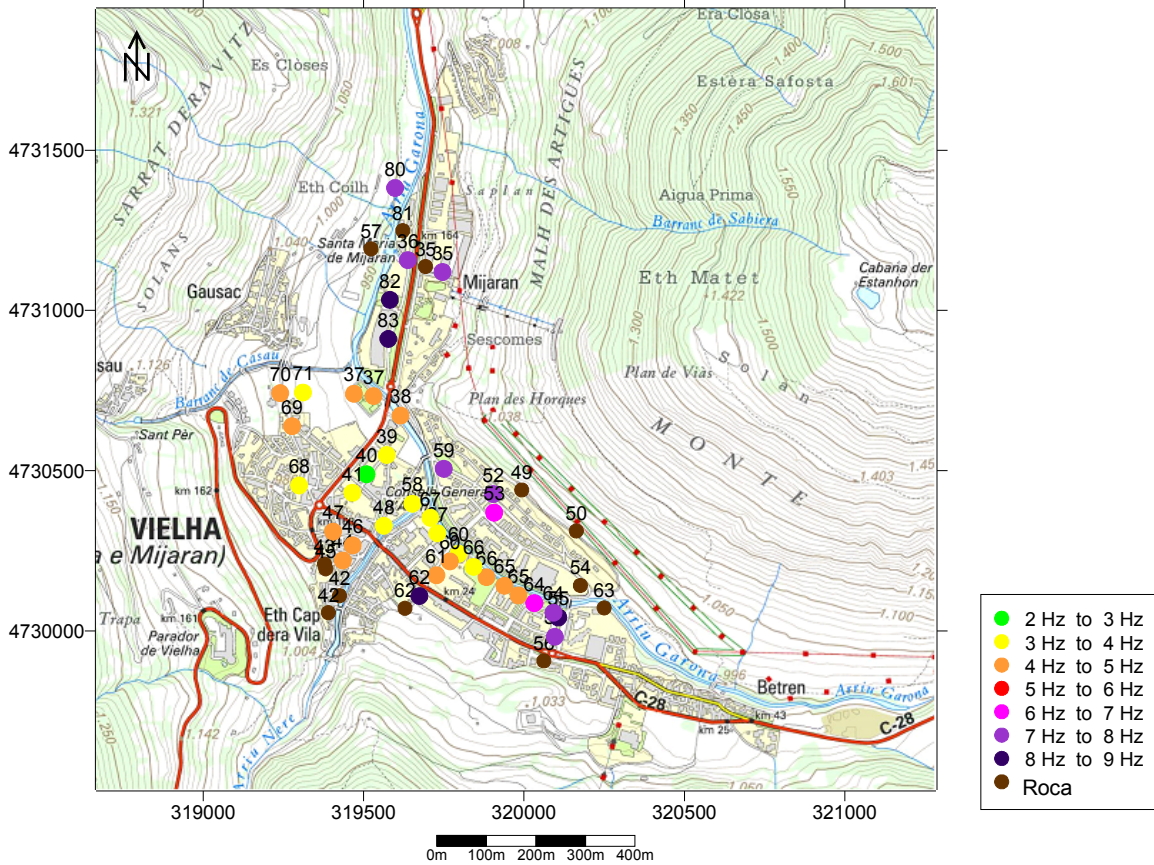


Figura 5.16. Distribución del valor de frecuencia fundamental del suelo determinado para los emplazamientos estudiados en el poblado de Vielha.

Con el fin de estudiar la variación de la frecuencia fundamental del suelo a lo largo y ancho de la cubeta sobre la que se encuentra el valle que conforma la población de Vielha, se realizaron diversos perfiles transversales y longitudinales. La ubicación de los perfiles se muestra en la figura 5.17. Los perfiles AB, CD y EF atraviesan el valle de forma longitudinal, mientras que los perfiles GH, IJ, KL, MN y OP lo atraviesan transversalmente. A continuación se presentan los resultados obtenidos para cada uno de los perfiles y se muestra como es la variación de la frecuencia fundamental del suelo a lo largo de cada uno.

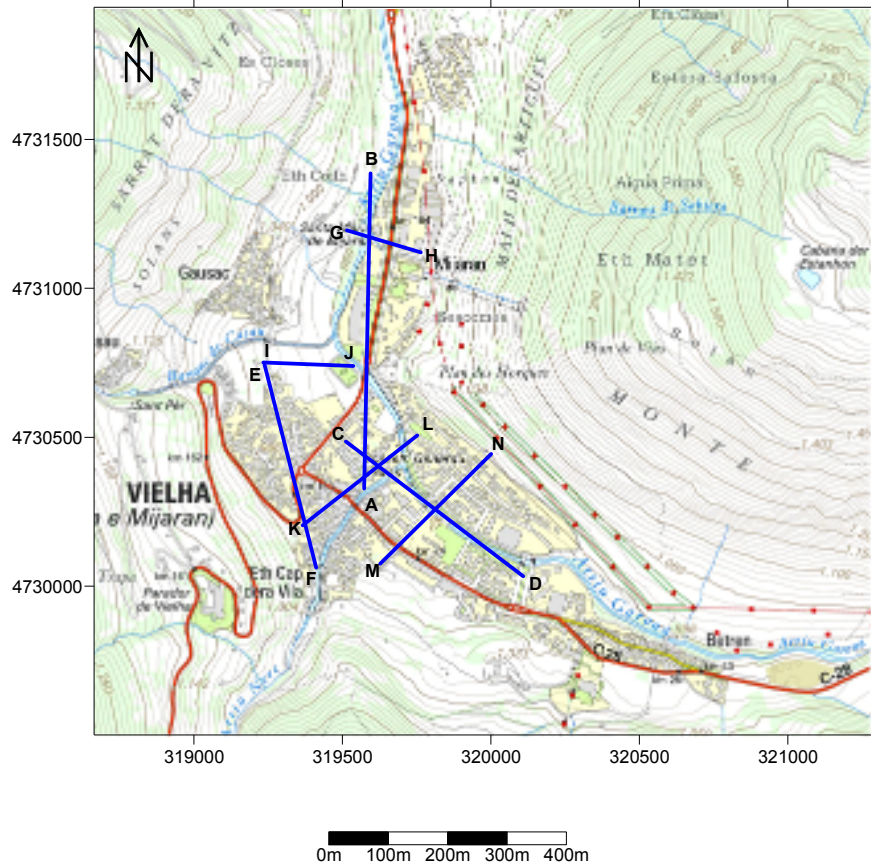
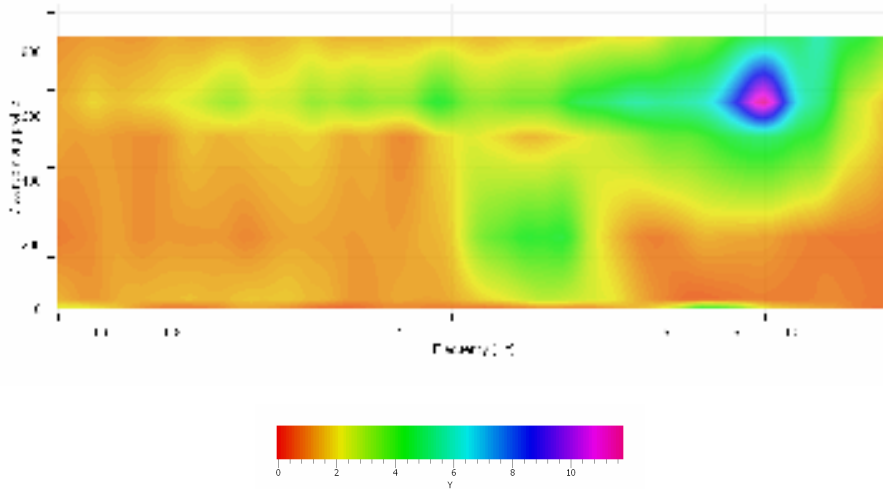


Figura 5.17. Ubicación de los perfiles realizados en la población de Les.

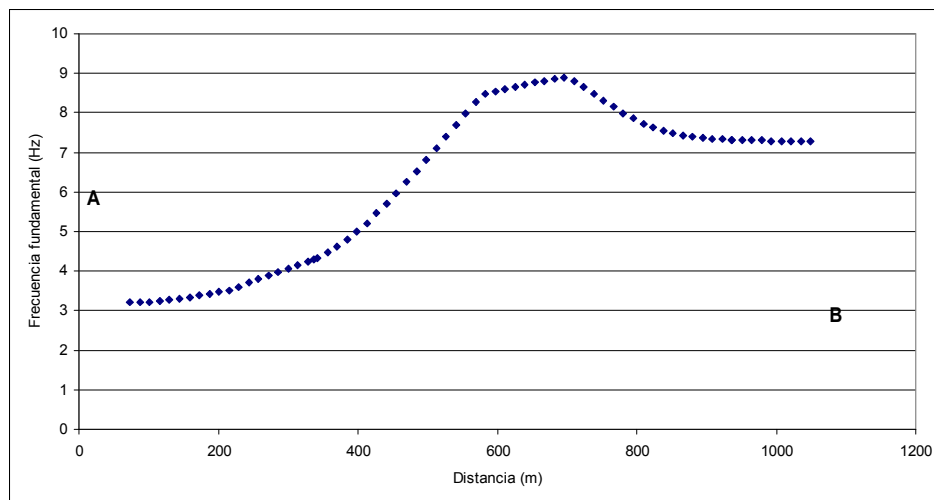
El primer perfil a ser estudiado corresponde al perfil AB, cuya dirección aproximada es NS. Este perfil se caracteriza porque atraviesa de forma longitudinal el sector norte del valle sobre el que se encuentra la población de Vielha. En la figura 5.17 se muestra como es la variación del valor de frecuencia fundamental del suelo a lo largo del valle. Nótese que el extremo norte del perfil corresponde al punto B, mientras que su extremo sur le corresponde al punto A.

La gráfica (a) de la figura 5.18 muestra la variación de la frecuencia fundamental del suelo a lo largo del perfil AB. Puede observarse como los mayores valores de frecuencia fundamental del suelo se registraron en el extremo norte del perfil, valor que va disminuyendo a medida que se avanza por el perfil en dirección sur. En dicha imagen también puede observarse una tendencia de la forma que se esperaría tenga la base de la cubeta.

Al igual que en la gráfica (a), en la gráfica (b) de la figura 5.18 se observan los mayores valores de frecuencia fundamental del suelo en el extremo norte del perfil. A medida que se va avanzando en dirección sur a lo largo del perfil, el valor de la frecuencia fundamental del suelo va disminuyendo. Los valores de frecuencia fundamental se encuentran ligados al espesor de sedimentos y a la geometría que caracteriza a una cubeta. La disminución del valor de frecuencia fundamental a lo largo del perfil AB sugiere una aproximación al centro de la cubeta, sector donde hay un aumento en el espesor de sedimentos.



(a)



(b)

*Figura 5.18. Resultados obtenidos del perfil AB. (a) Distribución de la frecuencia fundamental a lo largo del perfil AB. (b) Representación gráfica de la distribución de la frecuencia fundamental a lo largo del perfil AB.*

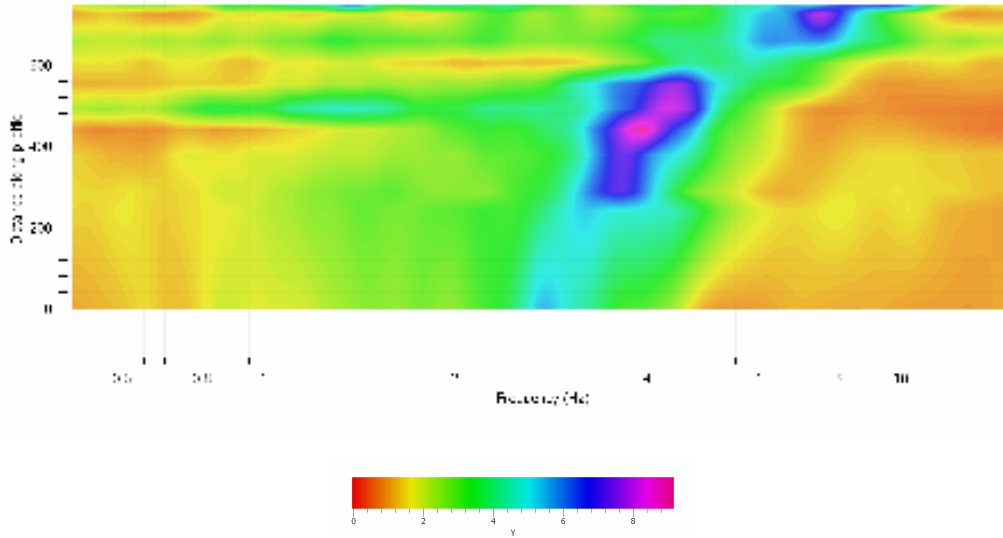
En el extremo norte del perfil, correspondiente al extremo B, se observa un ligero aumento en el valor de frecuencia fundamental del suelo registrado. Este comportamiento podría deberse al modelado generado en la base de la cubeta durante la erosión glacial de la misma.

En la figura 5.19 se muestran los resultados obtenidos para el perfil CD. Al igual que el perfil AB, este perfil atraviesa de forma longitudinal al valle donde se encuentra la población de Vielha, pero se diferencia en que este se encuentra ubicado en el sector sur de dicho valle y posee una dirección aproximada NE-SO. El extremo noreste del perfil se encuentra representado por el punto C mientras que el extremo suroeste lo representa el punto D.

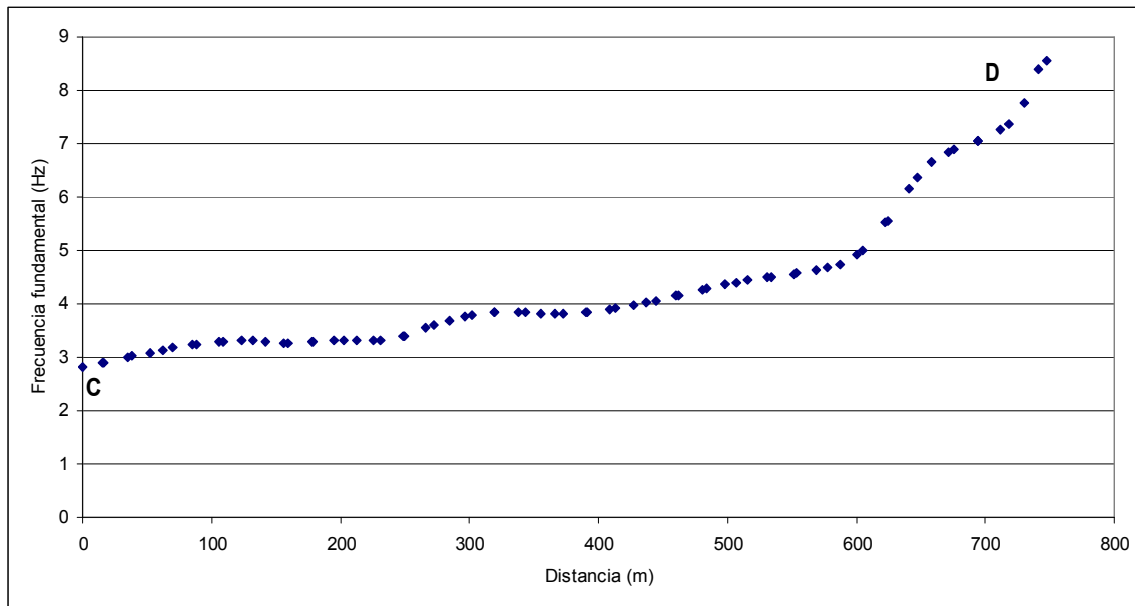
En la imagen (a) de la figura 5.19 se muestra la variación de la frecuencia fundamental del suelo a lo largo del perfil CD. Obsérvese como dicha distribución describe muy claramente la forma que se espera que tenga la cubeta en este sector del valle. Las curvas de nivel que representan la topografía de la zona en la figura 5.17 indican que el extremo C del perfil se encuentra en una zona ancha del valle, mientras que a medida que se va avanzando en dirección suroeste a lo largo del perfil CD, las vertientes que generan el valle tienen mayor proximidad entre sí, ocasionando que se estreche el valle en este sector. Esta condición topográfica puede verse reflejada en la imagen (b) de la figura 5.19 donde se observa un aumento significativo en el valor de frecuencia fundamental del suelo hacia el extremo D del perfil. En la figura 5.15 (a) también puede apreciarse como las vertientes EW que generan al valle en el sector sur se aproximan entre sí a medida que se avanza en dirección oeste.

A lo largo del perfil CD se puede observar un aumento uniforme en el valor de la frecuencia fundamental del suelo en dirección oeste, presentándose un valor mínimo de 2.8 Hz, en el extremo noreste del perfil, correspondiente al emplazamiento 40 y un valor máximo de 8.7 Hz en el extremo suroeste del perfil correspondiente al emplazamiento 55. El valor de frecuencia fundamental del suelo registrado en el extremo este del perfil CD se asemeja al registrado en el extremo sur del perfil AB. Observando la ubicación que tienen los emplazamientos correspondientes a dichos extremos en el valle que

conforma la población de Vielha, dicho sector puede ser interpretado como el área de mayor profundidad de la cubeta, por ende, con mayor espesor de sedimentos.



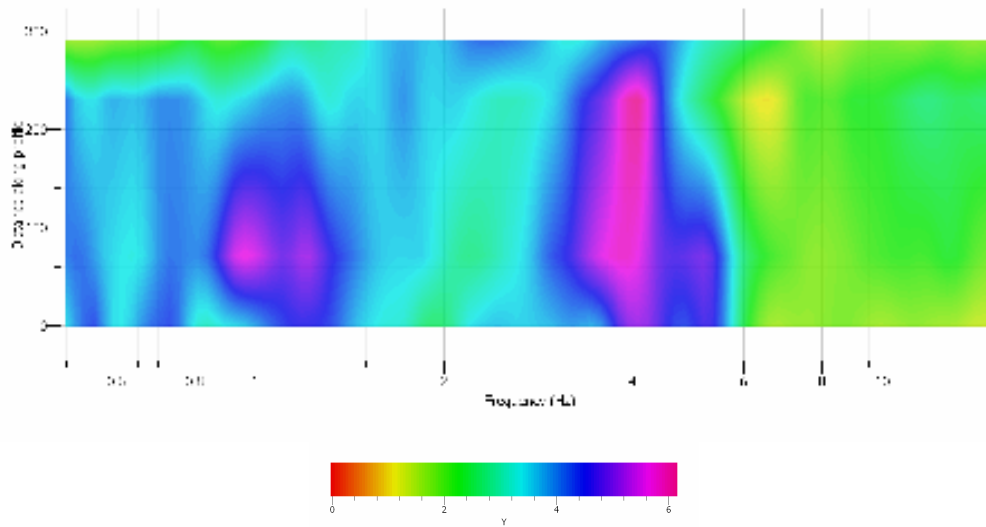
(a)



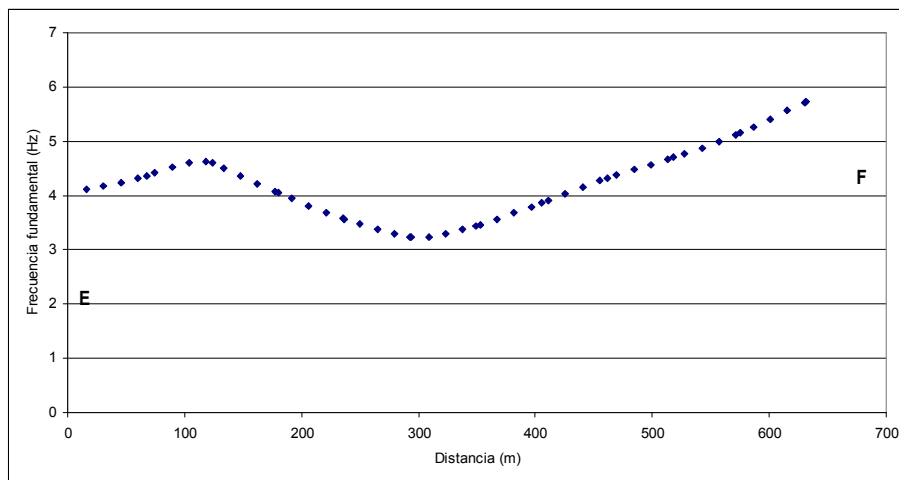
(b)

*Figura 5.19. Resultados obtenidos del perfil CD. (a) Distribución de la frecuencia fundamental a lo largo del perfil CD. (b) Representación gráfica de la distribución de la frecuencia fundamental a lo largo del perfil CD.*

Como último perfil transversal al valle donde se encuentra la población de Vielha, se trazó el perfil EF. Este perfil se encuentra ubicado en el sector sur del poblado y tiene una dirección aproximada NS. En la figura 5.20 se muestra como es la variación del valor de frecuencia fundamental del suelo a lo largo del perfil. La imagen superior (a) muestra como es dicha variación, mientras que la imagen inferior (b) también muestra la variación de frecuencia fundamental del suelo a lo largo del perfil EF pero en forma gráfica.



(a)



(b)

Figura 5.20. Resultados obtenidos del perfil EF. (a) Distribución de la frecuencia fundamental a lo largo del perfil EF. (b) Representación gráfica de la distribución de la frecuencia fundamental a lo largo del perfil EF.

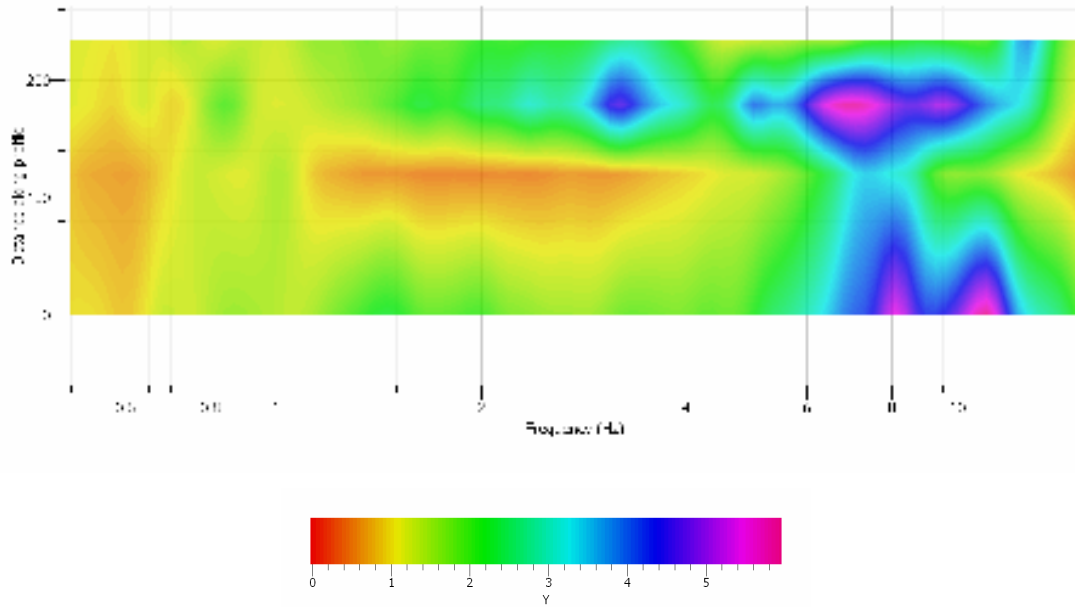
En la figura 5.17 puede observarse como el perfil EF se encuentra casi paralelo a la ladera de la montaña ubicada a la izquierda del perfil, por lo que los valores de frecuencia fundamental del suelo registrados a lo largo del perfil se encuentran influenciados a la cercanía a la que este se encuentre de las laderas de la montaña y en función a la sinuosidad que estas presentan. En términos generales, a medida que se avanza en dirección oeste a lo largo del perfil EF, la frecuencia fundamental del suelo aumenta hasta alcanzar valores cercanos a los 6 Hz. El extremo sur del perfil, correspondiente al punto F se encuentra muy próximo al emplazamiento 42. La curva H/V obtenida para el emplazamiento 42 presenta un comportamiento plano con bajos valores de H/V, característico de emplazamientos ubicados sobre roca o en suelos con espesor de sedimentos poco significativo. Tomando en cuenta la cercanía que tiene el extremo sur del perfil EF al emplazamiento 42 y, observando la variación de la frecuencia fundamental del suelo cuando se avanza en sentido sur a lo largo del perfil, se puede sugerir que dicho aumento es debido a la disminución en el espesor de los sedimentos presentes en el área. Lo que se traduce en un alejamiento del centro de la cubeta a medida que se avanza hacia el extremo sur del perfil EF.

Para realizar el análisis de la variación de la frecuencia fundamental del suelo en sentido transversal al valle donde se encuentra la población de Vielha, se analizaron cuatro perfiles. Los perfiles GH e IJ se encuentran ubicados en el sector norte del valle y poseen una dirección aproximada EW. Los dos perfiles restantes, KL y MN se encuentran ubicados en el sector sureste del valle y tienen una dirección aproximada SW-NE (figura 5.17).

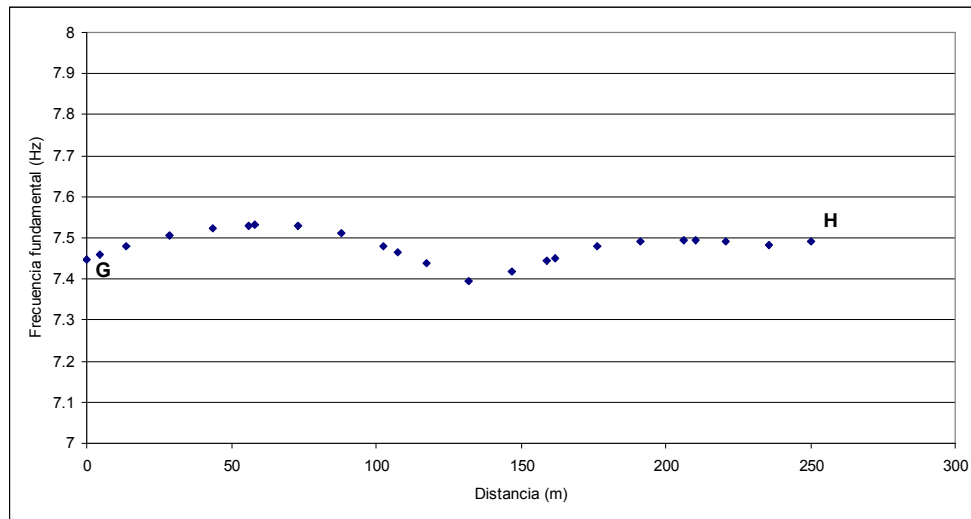
Los resultados obtenidos para el perfil GH se muestran en la figura 5.21. Las imágenes superior e inferior de la figura 5.21 muestran como es la distribución de la frecuencia fundamental del suelo a lo largo del perfil GH. En términos generales, la curva H/V obtenida para los emplazamientos por los que pasa el perfil GH presenta un pico significativo en la curva H/V para frecuencias alrededor de los 7 Hz, mientras que los emplazamientos más próximos al perfil o bien presentaron una respuesta plana en la curva H/V o presentaron un pico significativo para valores de frecuencia característicos de suelos con muy poco espesor de sedimentos. Todo esto permite sugerir que el perfil



GH se encuentra en un sector del valle muy alejado del centro de la cubeta y donde el espesor de sedimentos presentes es poco significativo.



(a)

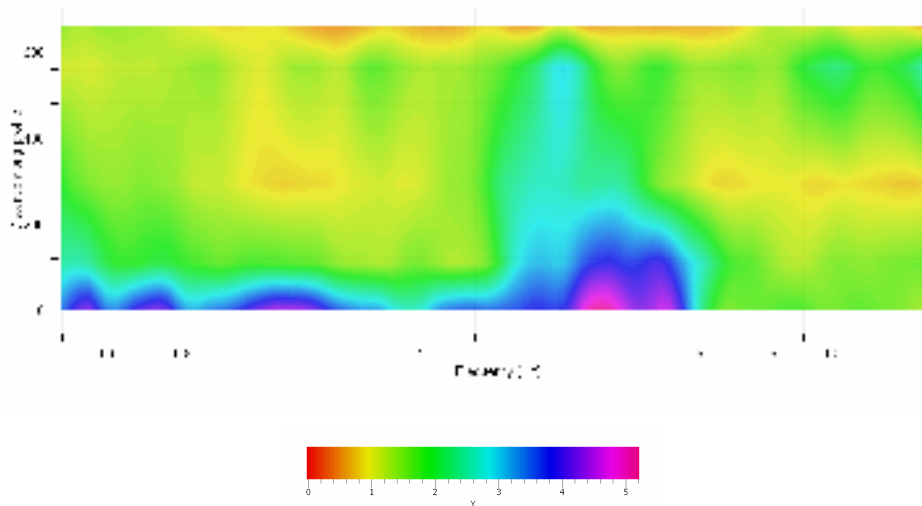


(b)

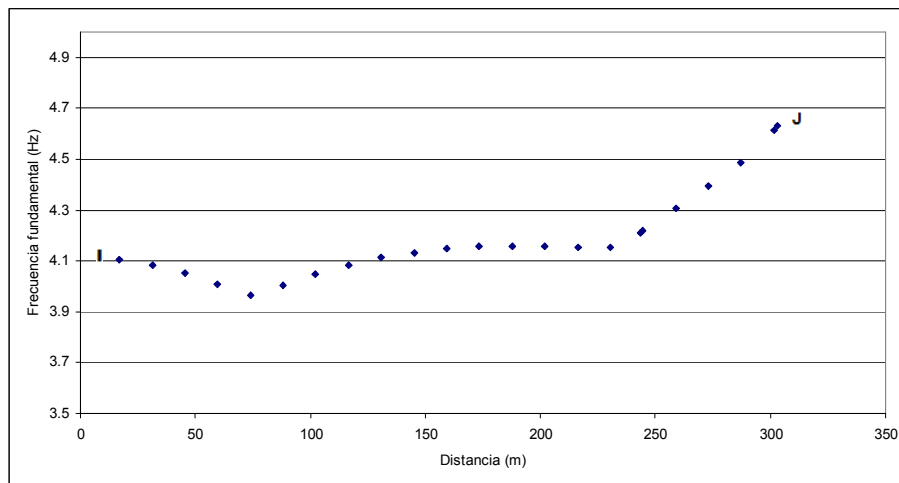
Figura 5.21. Resultados obtenidos del perfil GH. (a) Distribución de la frecuencia fundamental a lo largo del perfil GH. (b) Representación gráfica de la distribución de la frecuencia fundamental a lo largo del perfil GH.



En la figura 5.22 se muestran los resultados obtenidos para el perfil IJ. En la imagen (b) de la figura 5.22 puede observarse como los menores valores de frecuencia fundamental registrados a lo largo del perfil se encuentran hacia el extremo este y zona central del perfil, punto a partir del cual comienzan a aumentar hasta llegar a los 4.7 Hz, valor máximo registrado en el perfil. Tomando en cuenta que los valores de frecuencia fundamental del suelo son reflejo de la geometría de la cubeta que se está estudiando, la imagen inferior de la figura 5.22 presenta una idea de cómo sería dicha geometría en el área de la cubeta sobre la que se encuentra ubicado el perfil IJ.



(a)



(b)

Figura 5.22. Resultados obtenidos del perfil IJ. (a) Distribución de la frecuencia fundamental a lo largo del perfil IJ. (b) Representación gráfica de la distribución de la frecuencia fundamental a lo largo del perfil IJ.

El perfil KL, junto al perfil MN, son los dos perfiles transversales ubicados más al sur del valle en el que se encuentra la población de Vielha. Ambos perfiles atraviesan el sector más urbanizado de la población (figura 5.17). En la figura 5.23 se muestran los resultados obtenidos para el perfil KL. La imagen superior (a) muestra la variación de la frecuencia fundamental del suelo a lo largo del perfil. Puede observarse como dicha variación describe lo que sería la geometría de la cubeta sobre la que se encuentra el valle en estudio.

La imagen (b) de la figura 5.23 muestra una representación gráfica de la variación de la frecuencia fundamental del suelo a lo largo del perfil KL. Puede observarse como la forma obtenida en la curva coincide con el resultado en la imagen (a). Puede observarse como a medida que se avanza en dirección noreste a partir del extremo suroeste del perfil, el valor de la frecuencia fundamental del suelo disminuye de 5 Hz, extremo K, hasta 3 Hz, para luego comenzar a aumentar hasta alcanzar un valor aproximado de 7 HZ.

En la figura 5.17 puede observarse como los extremos del perfil KL se encuentran ubicados próximos a las laderas de las montañas cercanas. También se puede observar la lejanía que existe entre las vertientes, generando mayor anchura en el valle en comparación a otros sectores donde las vertientes se encuentran más próximas entre sí, por lo que el valle es más estrecho. Todas estas características topográficas se ven reflejadas en la imagen inferior de la figura 5.23. Se observa un mayor espesor de sedimentos en el centro del perfil, área donde los emplazamientos estudiados se encuentran más alejados de las laderas de la montaña. El espesor de sedimentos va disminuyendo a medida que se avanza hacia los extremos del perfil, dicha disminución se ve reflejada en el aumento del valor de la frecuencia fundamental del suelo.

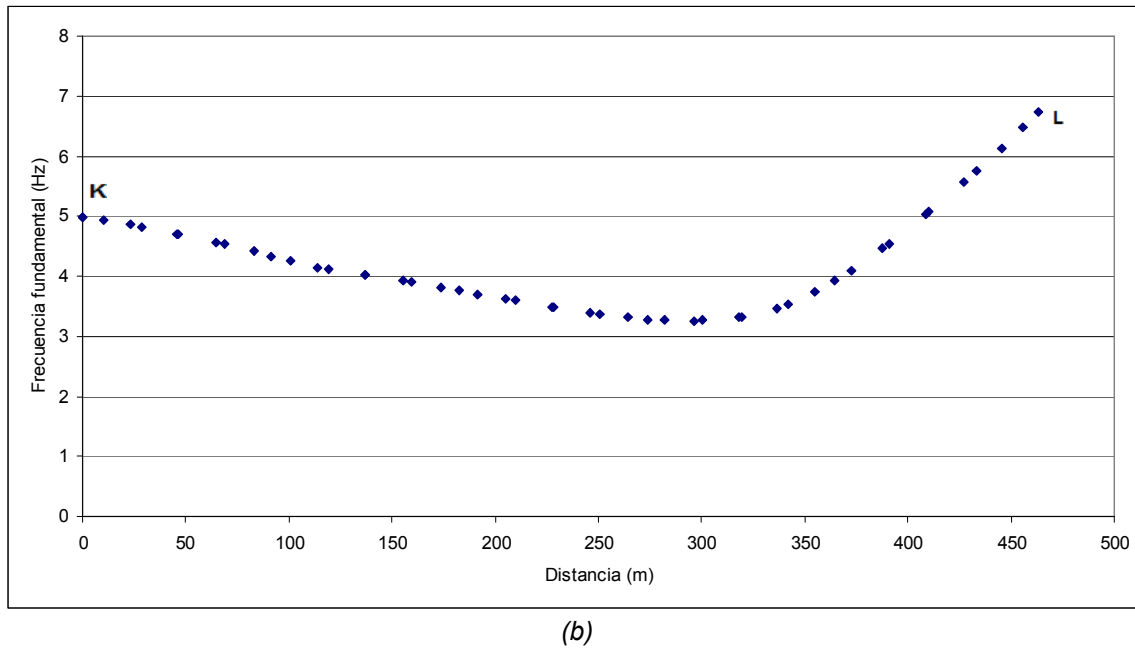
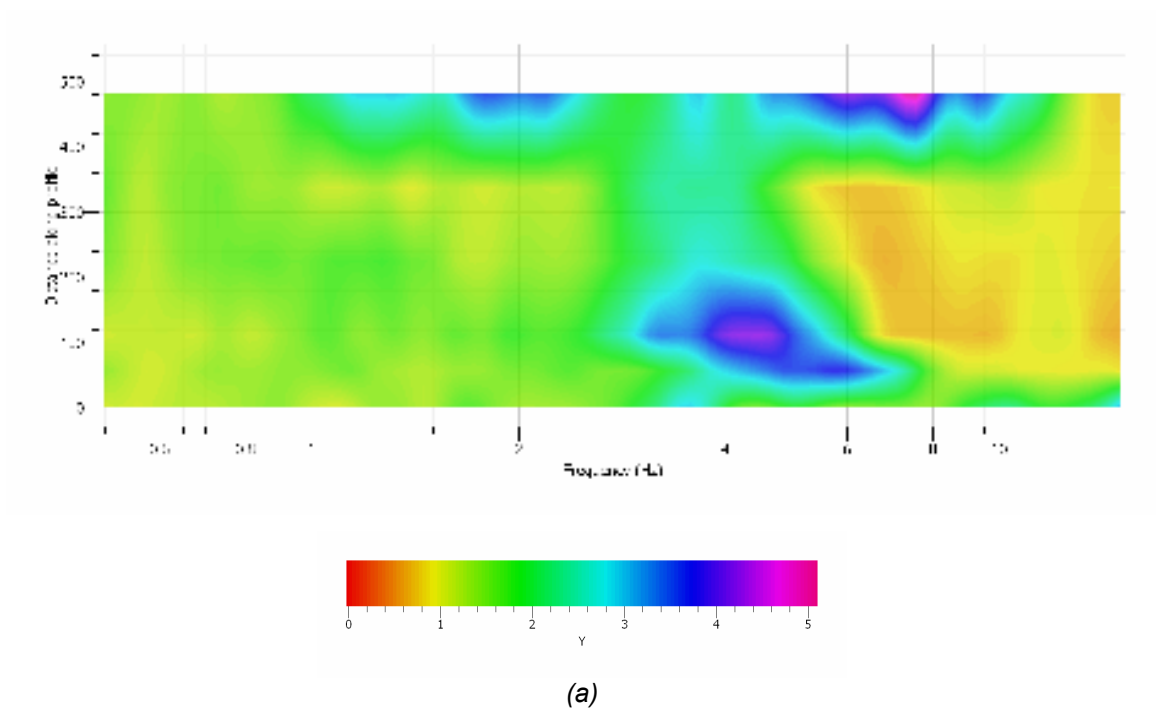


Figura 5.23. Resultados obtenidos para el perfil KL. (a) Distribución de la frecuencia fundamental a lo largo del perfil KL. (b) Representación gráfica de la distribución de la frecuencia fundamental a lo largo del perfil KL.

El último perfil estudiado en la población de Vielha corresponde al perfil MN. Los resultados correspondientes a este perfil se muestran en la figura 5.24. Al igual que lo observado en los resultados obtenidos para el perfil KL, en las imágenes (a) y (b) de la figura 5.24 se puede observar como la distribución de la frecuencia fundamental del suelo a lo largo del perfil MN describe la geometría del tramo de la cubeta que este perfil atraviesa.

En la imagen (b) de la figura 5.24 se puede observar como hay una variación significativa en el valor de la frecuencia fundamental del suelo registrado en los extremos y centro del perfil MN. Los máximos valores de frecuencia fundamental del suelo se encuentran en el orden de los 8 Hz y se alcanzan en los extremos del perfil, mientras que los mínimos se pueden encontrar por debajo de los 4 Hz y se ubican en el centro del perfil MN. Dicha variación puede ser atribuida a un aumento significativo en el espesor de sedimentos en el centro del perfil, mientras que en los extremos, por estar más próximos a las laderas de las montañas, el espesor de sedimentos es menor, lo que se traduce en un aumento en el valor de frecuencia fundamental del suelo. Los emplazamientos próximos a los extremos del perfil MN presentaron una respuesta plana en la curva H/V o presentaban el pico en valores de frecuencia correspondientes a emplazamientos ubicados sobre suelos con poco espesor de sedimentos. Esto sugiere que la disminución del espesor de sedimentos observada en los extremos del perfil continúa a medida que se avanza hacia las laderas de la montaña.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos a partir del estudio de ruido sísmico en los diferentes emplazamientos correspondientes a la población de Vielha, la distribución de los valores de la frecuencia fundamental del suelo, su variación a lo largo de los perfiles transversales y longitudinales trazados en el valle y el reconocimiento visual realizado en la zona en estudio durante la campaña de medición de ruido sísmico, se ha podido delimitar el valle sobre el que se encuentra la población de Vielha. En general, se delimitó el área del valle que presentó valores de frecuencia fundamental del suelo característicos de suelos poco compactos o cuyo espesor de sedimentos no es despreciable. En la figura 5.25 se resalta en tramas de color marrón dicha delimitación. Los círculos de color marrón que rodean al área delimitada corresponden a los emplazamientos cuya curva H/V dió una respuesta plana, propia de emplazamientos sobre roca, o cuyo pico de H/V se obtuvo para valores de frecuencia

muy elevados, característica propia de suelos con espesor de sedimentos poco significativo.

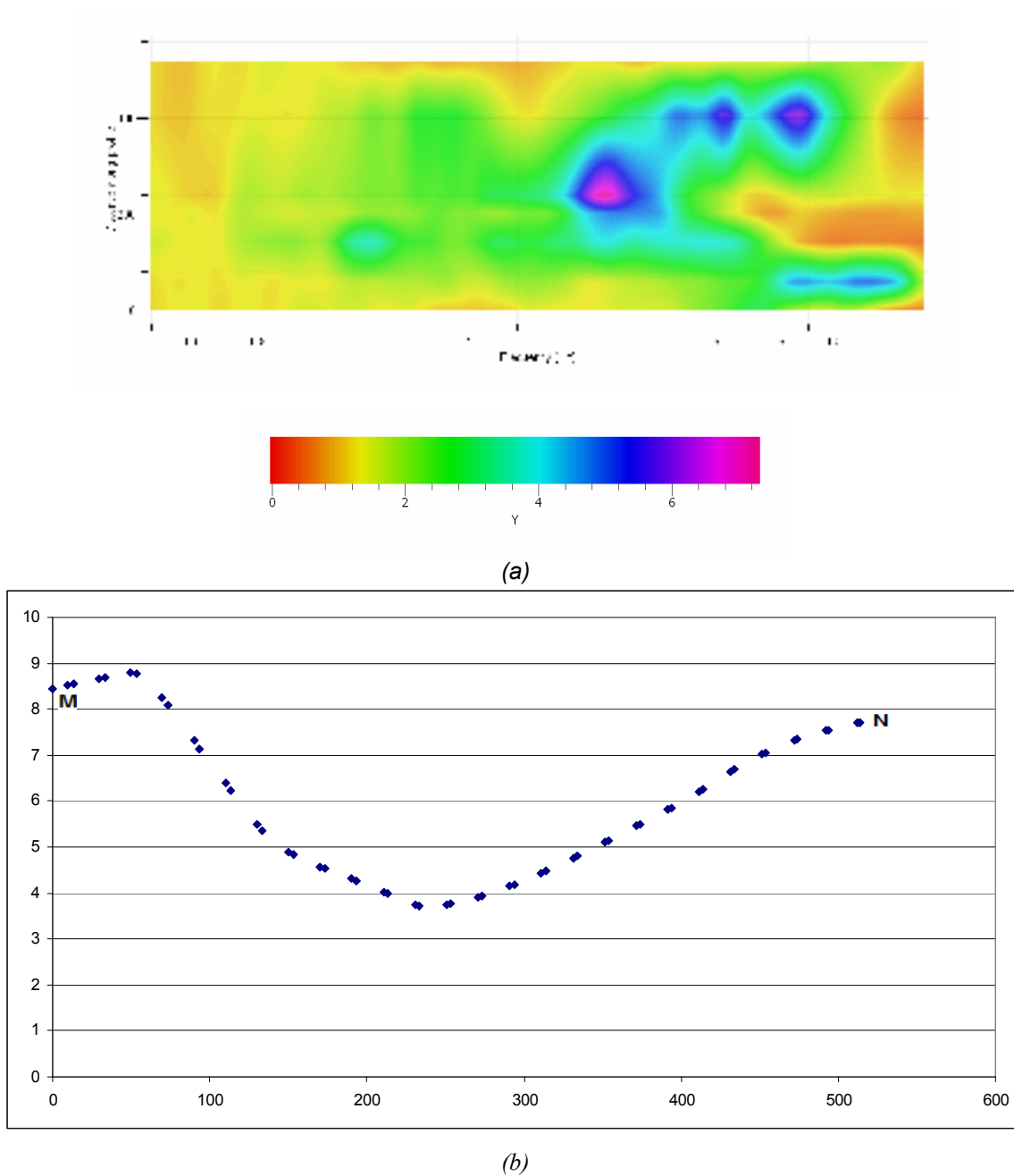


Figura 5.24. Resultados obtenidos para el perfil MN. (a) Distribución de la frecuencia fundamental a lo largo del perfil MN. (b) Representación gráfica de la distribución de la frecuencia fundamental a lo largo del perfil MN.

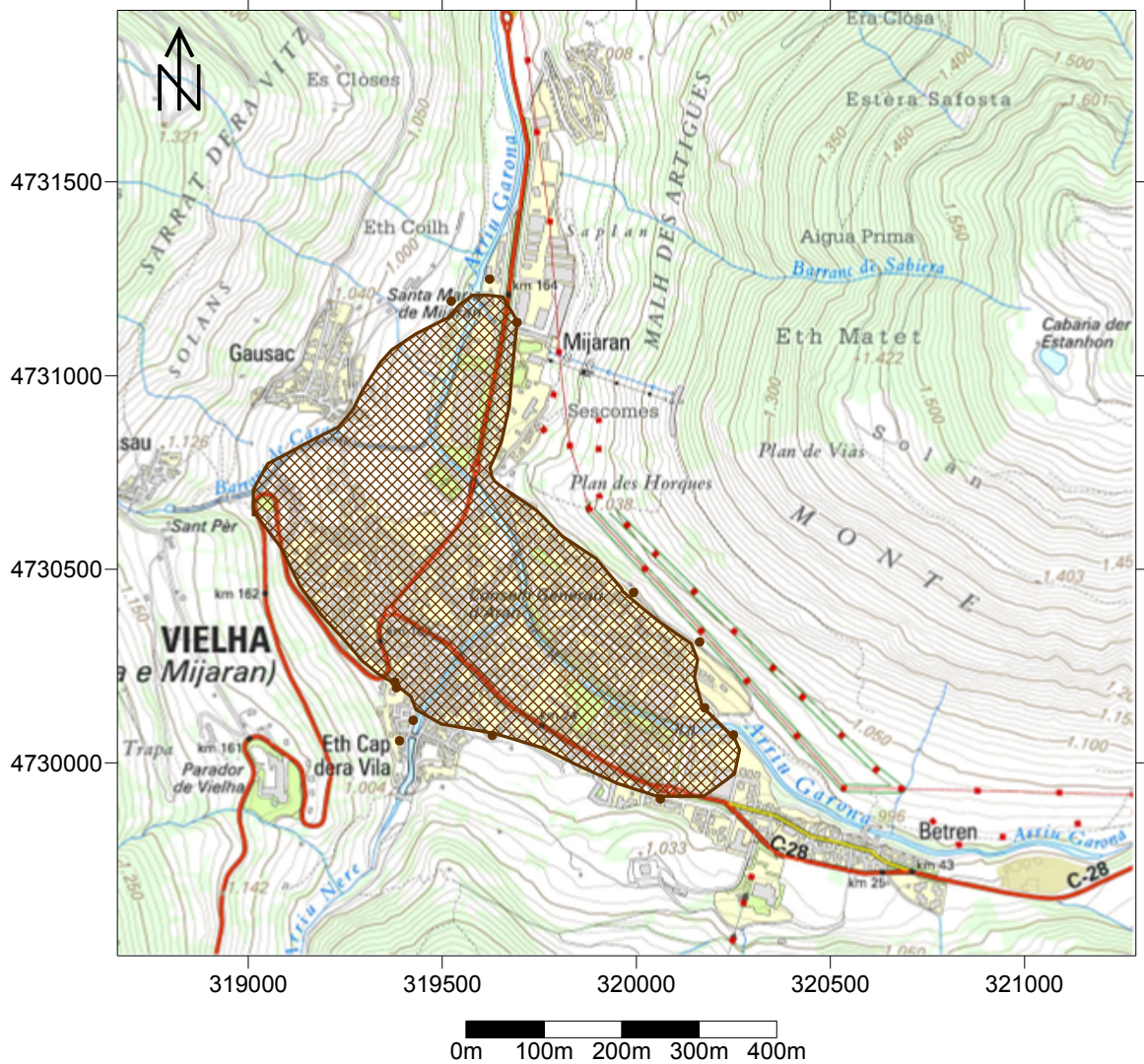


Figura 5.25. Delimitación del valle donde se encuentra la población de Vielha. Resaltado en trama marrón se encuentra la zona con valores de frecuencia fundamental correspondientes a suelos poco consolidados. Los puntos color marrón representan emplazamientos con respuesta plana en la curva H/V o valores de frecuencia fundamental propios de suelos con espesor de sedimentos poco significativos.

#### **5.2.4. Población de Arties**

La figura 5.26 muestra dos visiones en 3D del valle en el que se encuentra ubicada la población de Arties. En la imagen superior (a) se puede observar que el extremo sur de la población de Arties se encuentra ubicado entre dos vertientes con dirección N-S, poco modeladas por la erosión, originándose así un valle en V. Los valores de frecuencia fundamental determinados para esta región pueden estar muy ligados a esta condición geológica, así como a la proximidad a la que se encontraban los emplazamientos estudiados de las laderas de las montañas que conforman dicho valle en V.

La figura 5.26 (b), muestra otra visión del valle. En esta ocasión se presenta al valle desde la vertiente E-W. Debido a efectos erosivos, estas vertientes poseen una pendiente menos pronunciada que las observadas en la imagen superior, correspondiente a las vertientes N-S.

El efecto de las pendientes menos pronunciadas se ve reflejado en los valores de frecuencia fundamental obtenidos para esta zona, ya que estos presentan un valor constante a lo largo de la cubeta, sin variaciones ni cambios significativos, excepto cuando hay aproximación a las laderas de la montaña, observándose un brusco aumento en el valor de la frecuencia fundamental del suelo.





(a)

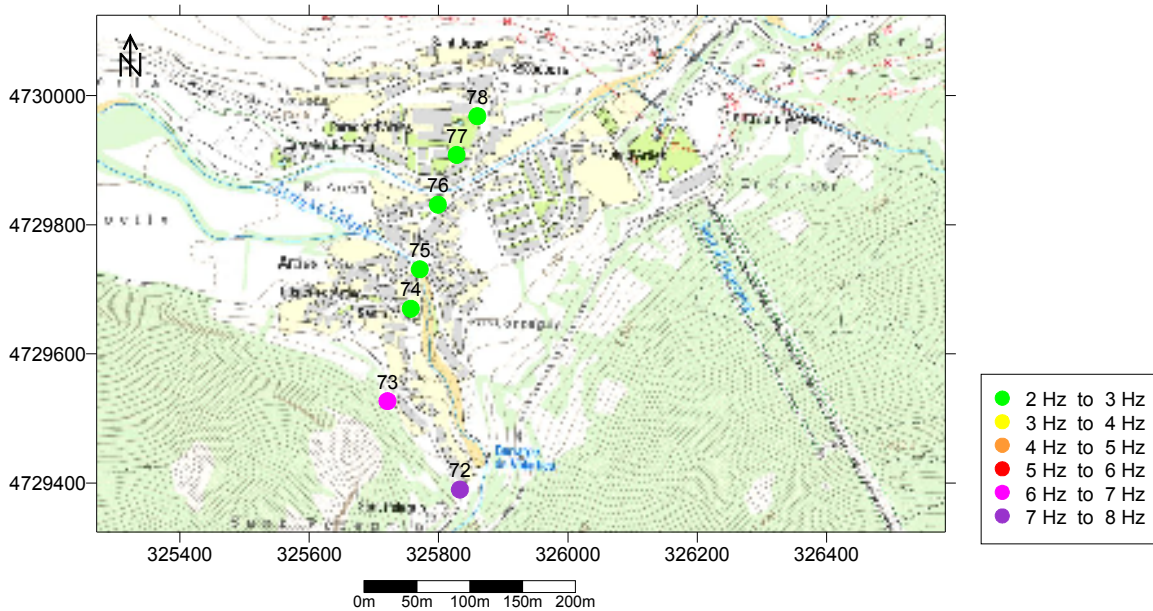


(b)

*Figura 5.26. Topografía presente en la población de Arties. (a) Vertiente N-S. (b) Vertiente E-W. La línea roja muestra la ubicación aproximada de los emplazamientos estudiados*

En la tabla 5.1 se puede observar el valor de la frecuencia fundamental del suelo determinado para cada uno de los emplazamientos estudiados en la población de Arties. En términos generales, la frecuencia fundamental varía entre 2.8 y 7 Hz. Estos valores fueron graficados con el fin de poder observar la variación de la frecuencia fundamental del suelo en la zona en estudio. La figura 5.27 muestra dicha distribución.





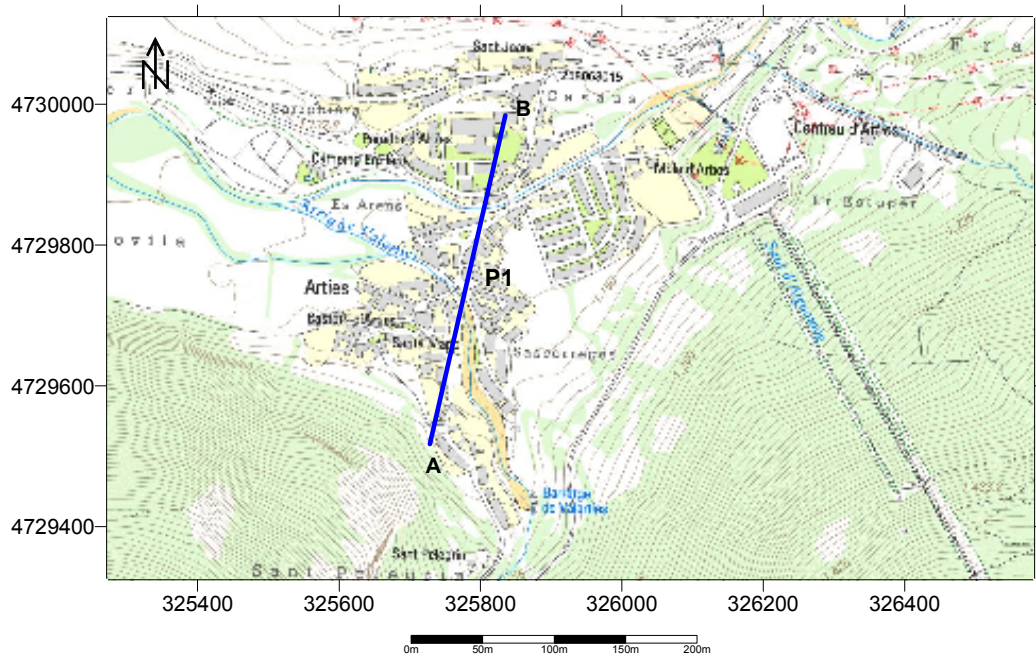
*Figura 5.27. Distribución de la frecuencia fundamental del suelo determinada para los emplazamientos estudiamos en la población de Arties.*

Puede observarse como los mayores valores de frecuencia fundamental del suelo se encuentran en el extremo sur de la población, mientras que los menores valores se encuentran ubicados hacia el centro de la cubeta principal del valle, zona donde se ubica el núcleo urbano de la población de Arties. No se graficaron emplazamientos sobre roca, ya que ninguna curva H/V correspondiente a las medidas de ruido sísmico registradas presentó un comportamiento plano.

Debido a que la distribución de los valores de frecuencia fundamental del suelo pueden sugerir la geometría de la cubeta sedimentaria de la zona que se está estudiando y, tomando en cuenta las características topográficas del área, las vertientes con dirección E-W que forman el valle sobre el que se encuentra la población de Arties sugieren que dicho valle es un valle en U, caracterizado por paredes muy abruptas, pero con fondo cóncavo.

En la figura 5.28 se muestra la ubicación del perfil A-B, con dirección N-S, trazado sobre la población de Arties. La cercanía de las curvas de nivel que describen la topografía del área cercana al punto A del perfil, ubicado en el extremo sur del mismo, indican la proximidad que este punto tiene a la ladera de la montaña, mientras que el

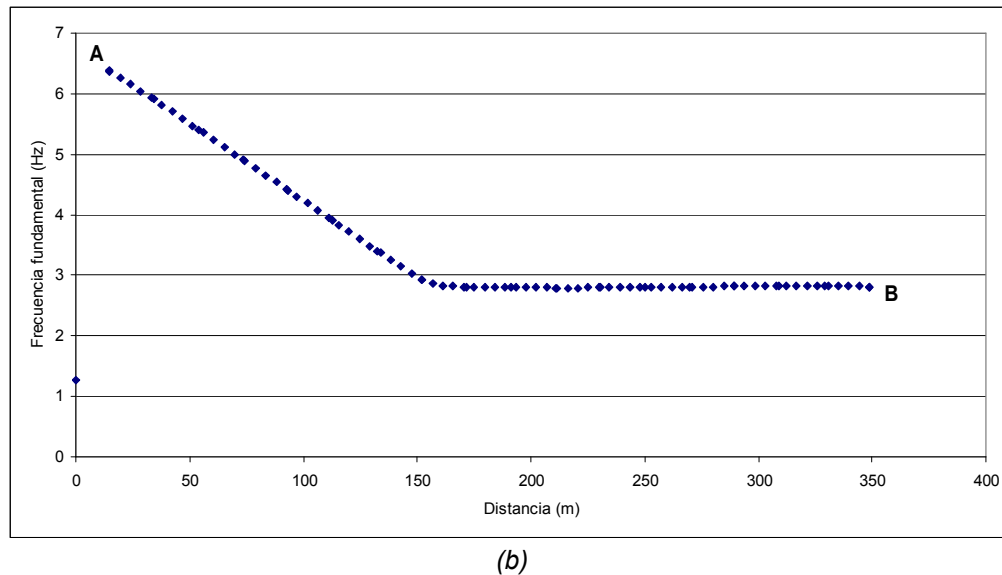
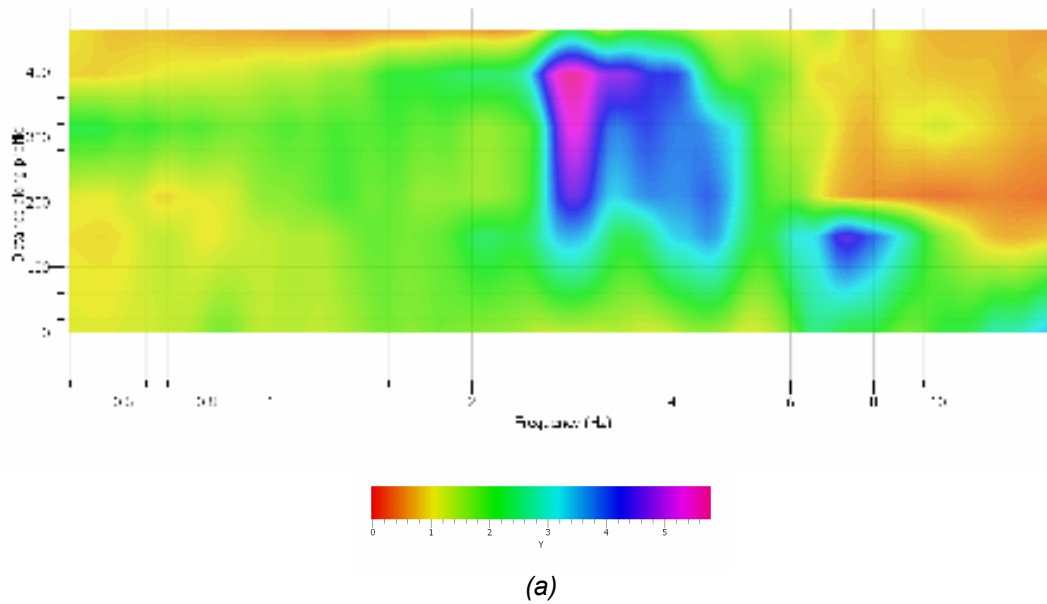
punto B, situado en el extremo norte del perfil, se encuentra en un área donde las curvas de nivel sugieren cambios menos abrupto en la topografía.



*Figura 5.28. Perfil A-B trazado sobre la población de Arties.*

La variación de la frecuencia fundamental del suelo a lo largo del perfil A-B se muestra en la figura 5.29 (b). La curva generada a partir de los valores de la frecuencia fundamental presenta un comportamiento coherente con las características topográficas anteriormente descritas. Se observa un cambio brusco en la pendiente de la curva en dirección S-N. El mayor valor de frecuencia fundamental se encuentra ubicado en el punto A. Sin embargo, a medida que el perfil avanza en dirección Norte, este valor tiende a estabilizarse, presentado fluctuaciones poco significativas. Los valores de frecuencia fundamental del suelo permiten sugerir que hay una capa delgada de sedimentos en áreas cercanas a la ladera de las montañas, mientras que el centro de la cubeta debe presentar espesores de sedimento más significativos, ya que es en esta zona donde se observa un pico en la curva de relación del cociente espectral H/V para valores de frecuencia bajos, rasgo característico de suelos poco consolidados y cuyo basamento rocoso no se encuentra muy superficial.

La figura 5.29 (a) muestra la distribución de la frecuencia fundamental del suelo a lo largo del perfil A-B. Puede apreciarse como la frecuencia fundamental del suelo presenta el mismo comportamiento que el observado en la imagen (a) de la misma figura. El mayor valor corresponde al extremo sur del perfil, representado con el extremo A, mientras que a medida que se avanza al centro de la cubeta, el suelo muestra un valor de frecuencia fundamental más estable.



*Figura 5.29. Resultados obtenidos para el perfil AB. (a) Distribución de la frecuencia fundamental a lo largo del perfil AB. (b) Representación gráfica de la distribución de la frecuencia fundamental a lo largo del perfil AB.*

---

## **CAPÍTULO 6**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

---



## **6.1. Conclusiones**

A continuación se muestran las conclusiones obtenidas para cada una de las cuatro poblaciones del Valle de Arán que fueron estudiadas durante la realización del presente trabajo, así como recomendaciones de trabajos futuros que pueden aportar información de interés para el desarrollo del proyecto SISPYR.

### **6.1.1. Población de Les**

En total se realizaron 23 medidas de ruido sísmico y se analizaron 3 perfiles, uno longitudinal y dos transversales al valle.

El valor mínimo de frecuencia fundamental del suelo registrado en todo el valle sobre el que se encuentra la población de Les fue de 1.7 Hz y corresponde al emplazamiento 3, ubicado al norte.

El valor máximo de frecuencia fundamental del suelo registrado en todo el valle sobre el que se encuentra la población de Les fue de 8.1 Hz y corresponde al emplazamiento 15 ubicado en la zona urbana.

La frecuencia fundamental del suelo en el núcleo urbano de la población de Les se encuentra entre los 2.3 y 8.1 Hz.

En términos generales, la frecuencia fundamental del suelo aumenta en dirección N-S, lo que se traduce en una disminución, en este mismo sentido, del espesor de los sedimentos que rellenan la cubeta que conforma el valle sobre el que se encuentra la población de Les.

No se realizaron medidas de ruido sísmico sobre roca o en emplazamientos cuya curva H/V diera una respuesta característica de emplazamientos ubicados sobre suelos con espesor de sedimentos poco significativos.

### **6.1.2. Población de Bossòst**

En total se realizaron 15 medidas de ruido sísmico y se analizaron dos perfiles, uno longitudinal y otro transversal al valle.

El mínimo valor de frecuencia fundamental del suelo medido en la población de Bossòst corresponde al emplazamiento 85, ubicado al oeste del río Garona, el cual presenta una frecuencia fundamental de 2.1 Hz.

El mayor valor de frecuencia fundamental del suelo medido corresponde al emplazamiento 22, con una frecuencia fundamental de 7.7 Hz y se encuentra ubicado al oeste, sobre la ladera de la montaña.

Los emplazamientos ubicados en el núcleo urbano de la población de Bossòst presentan valores de frecuencia fundamental ubicados entre los 4 y 6 Hz.

Se tomó un único registro sobre roca, correspondiente al emplazamiento 28, ubicado en el sector norte del valle.

En términos generales, los mayores valores de frecuencia fundamental del suelo en la población de Bossòst se encuentran ubicados al norte del valle y varían entre 5 y 7 Hz, disminuyendo hacia el sur. Hacia el este y sur del valle se registraron los menores valores, en el orden de los 2 Hz.

### **6.1.3. Población de Vielha**

En total se realizaron 40 medidas de ruido sísmico y se analizaron ocho perfiles, tres longitudinales y 5 transversales al valle.

El menor valor de frecuencia fundamental, de 2.8 Hz, corresponde al emplazamiento 40, ubicado en el núcleo urbano.

El mayor valor de frecuencia fundamental del suelo, de 9 Hz, le corresponde al emplazamiento 82, ubicado en el extremo norte del valle.

En términos generales, los emplazamientos que registraron menor valor de frecuencia fundamental del suelo se encuentran ubicados en el centro del valle, sector donde se encuentra el núcleo urbano de la población de Vielha. Los mayores valores de frecuencia fundamental del suelo se registraron en emplazamientos ubicados en las laderas de las vertientes que originan el valle y bordean al núcleo urbano.

Ocho medidas de ruido sísmico presentaron respuesta plana en la curva H/V, comportamiento característico de emplazamientos ubicados sobre roca. Cuatro medidas de ruido sísmico presentaron un pico del valor de H/V en frecuencias características a emplazamientos ubicados sobre suelos cuyo espesor de sedimentos es poco significativo. Estos emplazamientos se encuentran ubicados sobre laderas de montañas.

A grandes rasgos, el valor de frecuencia fundamental del valle sobre el que se encuentra la población de Vielha disminuye de norte a sur, en el sector norte del valle, y de oeste a este en el sector sur, ubicándose los menores valores en el núcleo urbano.

Los perfiles estudiados dan una aproximación de cómo es la geometría de la cubeta que genera al valle sobre el que se encuentra la población de Vielha.

Se generó un mapa donde se delimita la zona cuyo valor de frecuencia fundamental sugiere la existencia de los mayores espesores de sedimentos a lo largo del valle. El núcleo urbano de la población de Vielha se encuentra dentro de esta zona.

#### **6.1.4. Población de Arties**

En total se realizaron 7 medidas de ruido sísmico y se analizó un perfil transversal al valle principal.

En términos generales, la frecuencia fundamental varía entre 2.8 y 7 Hz.

La frecuencia fundamental del suelo aumenta en sentido N-S a lo largo del perfil trazado.



Los emplazamientos ubicados en el núcleo urbano de la población de Arties presentan valores de frecuencia fundamental ubicados entre los 2 y 4 Hz, siendo estos los valores más bajos registrados en la población de Arties.

No se realizaron medidas de ruido sísmico sobre rocas o en emplazamientos cuya curva H/V diera una respuesta característica de emplazamientos ubicados sobre suelos con espesor de sedimentos poco significativos.

## **6.2. Recomendaciones**

Estudios donde se determine la profundidad del basamento rocoso y con eso, el espesor de los sedimentos, serían de gran utilidad para poder definir de forma más exacta la geometría característica de las cubetas que conforman los valles sobre los cuales se encuentran las principales poblaciones de la comarca del Valle de Arán.

Realizar una búsqueda exhaustiva de sondeos, perforaciones, estudios geotécnicos, etc., que se hayan realizado en las principales poblaciones del Valle de Arán, y que puedan aportar información referente a los sedimentos que rellenan las diferentes cubetas presentes en el Valle de Arán.

Un estudio a detalle de la geología del cuaternario en el Valle de Arán aportaría información adicional que permitiría realizar una mejor zonificación de los valles sobre los que se encuentran las poblaciones de la comarca.

---

## **CAPÍTULO 7**

## **BIBLIOGRAFÍA**

---



Acevedo, J., Peralta, S., A. Alfaro. (2001). Función de transferencia del subsuelo a partir de microtemblores minimizando el ruido. Segundo Congreso Iberoamericano de Ingeniería Sísmica. Madrid.

Alfaro, A., Navarro, M., Sánchez, J., L. Pujades. (1999). Microzonificación sísmica de Barcelona utilizando el método de Nakamura. Ventajas y limitaciones. Proc Primer Congreso Nacional de Ing. Sísmica. Murcia. 1:273-278.

Alfaro, A., Pujades, L., Goula, X., Susagna, T., Navarro, M., Sánchez, J., J. Canas. (2001). Preliminary map of soil predominant periods in Barcelona by Using Microtremors, Pure and Applied Geophysics, 158, 2499-2511.

Atles comarcau de Catalonha. Val d'Aran. (1994). Vol 39. Primera edición. España.

Bard, P. (1999). Microtremor measurements: A tool for site effect estimation?, in The Effects of Surface Geology on Seismic Motion, Irikura, Kudo, Okada, and Sasatani Eds. Balkema, Rotterdam, Netherland. 1251-1279.

Beaumont, C., Muñoz, J., Hamilton, J., F. Philippe. (2000). Factors controlling the Alpine evolution of the central Pyrenees inferred from a comparision of observations and geodynamical models. Journal of Geophysical Research, B, Soild Earth and Planets, 105, 8121-8141.

Bendat J. y A. Piersol. (1986). Random data. Analysis and Measurements Procedures, Ed. John Wiley and Sons, New York.

Bonnefoy-Claudet S., Cornou, C., Kristek, J., Ohrnberger, M., Wathelet, M., Bard, P., Fäh, D., Moczo, P., F. Cotton. (2004). Simulation of seismic ambient vibration: I. H/V and array techniques on canonical models. 13<sup>th</sup> World Conference in Earthquake Engeneering, Vancouver, Paper 1120.

Bordonau, J., Pous, J., Queralt, P., J. Vilaplana. (1989). Geometría y depósitos de las cubetas glaciolacustres del Pirineo. Estudios geol., 45: 71-79.

Cid, J. (1999). Zonación sísmica de la ciudad de Barcelona basada en métodos de simulación numérica de efectos locales. Departament d'Enginyeria del Terreny, Cartogràfica i Geofísica (UPC). 215pp.

Choukroune, P., ECORS team. (1989). The ECORS Pernean deep seismic profile reflection data and the overall structure of an orogenic belt. *Tectonics*, 8, 23-39.

Coral, H. (2002). Utilización de métodos experimentales y de simulación numérica para la microzonación sísmica de áreas urbanizadas de Andorra. Departament d'Enginyeria del Terreny, Cartogràfica i Geofísica (UPC). 207pp.

Euroseismod. (1998). Development and Experimental Validation of Advanced Modelling Techniques in Engineering Seismology and Earthquake Engineering Final Report. Project ENV4-CT96-0255.

Figueras, S. (1994). Simulació numèrica del moviment del sòl produït per terratrèmols. Aplicació a moviments febles i forts. Departament d'Enginyeria del Terreny, Cartogràfica i Geofísica (UPC). 279pp.

Franklin, R. Caselles, J., Canas, J., Caples, J., Ll. Pujades. (2006). Estimación de la respuesta de sitio mediante el método del coeficiente espectral aplicado a ruido ambiental: aplicación a la Cuitat Vella de Valencia. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*. Vol 22, 2, 169-191.

García-Sansegundo, J. (1991). Estratigrafía y estructura de la Zona Axial Pirineica en la Transversal del Valle de Arán y de la Alta Ribagorza (Parte I). *Boletín Geológico y Minero* 102, 781-829.

García-Sansegundo, J. (1992). Estratigrafía y estructura de la Zona Axial Pirineica en la Transversal del Valle de Arán y de la Alta Ribagorza (Parte II). *Boletín Geológico y Minero* 103, 42-93.

García Sansegundo, J. (2004). Estructura varisca de los Pirineos. Geología de España, (J.A. Vera, Ed.), SGE-IGME, Madrid, 254-258.

Giraldo, V., Alfaro, A., Pujades, L., J. Canas. (1999). Estimación de los efectos locales con movimientos sísmicos y microtemblores. Monografías CIMNE IS-36.

Héloïse, C. (2008). Ambient vibrations measurements in Barcelona for soil characterization. SISNEPI project.

Institut Cartogràfic de Catalunya.

<http://www.icc.es/>

Kanai K., T. Tamaka. (1961). On Microtremors. VIII Bulletin Earthquake Research Institute. Tokio Univ. 39, 97-114.

Lachet, C., P. Bard. (1994). Numerical and Theoretical Investigations on the possibilities and Limitations of Nakamura's Technique, J. Phys. Earth, 42, 337-397.

Lermo, J., F. Chávez-García. (1994). Site effect evaluation using spectral ratios with only one station. Bull. Seism. Soc. Am., 83, 1574-1594.

Macau, A. (2008). Microzonación sísmica. Contribución a los estudios de peligrosidad sísmica a escala local en zonas rurales y urbanas. Departament d'Enginyeria del Terreny, Cartogràfica i Geofísica (UPC). 328pp.

Moreno L., A. Alfaro. (2000). De los Microsismos a los Microtemblores Investigación en el Instituto Geofísico. Memorias del VIII Congreso Colombiano de Geotécnia. Bogotá.

Muñoz, J. (2002). Alpine tectonics I: the Alpine system north of the Betic Cordillera. Tectonic setting; the Pyrenees. Geology of Spain, W. Gibbons y T. Moreno Eds., Geol. Soc (London), 370-385.

Nakamura, Y. (1989). A Method For Dynamic Characteristics Estimations Of Surface Using Microtremor On the Ground Surface, Quarterly Report of Railway Tech Res. Inst, 30, 25-33.

Nakamura, Y. (2000). Clear Identification of Fundamental Idea of Nakamura's Technique and its Applications, Procc. 12WCEE.

Nogoshi, M., T. Igarashi. (1971). On the amplitude characteristics of microtremor. Jour. Seism. Soc. Japan, 23, 264-280. (in Japanese with English abstract).

Ortuño, M. (2008). Deformación activa en el Pirineo Central: La falla Norte de la Maladeta y otras fallas activas. Departamento de Geodinámica y Geofísica (UPC). Barcelona. 345pp.

Schmidt, V. (2009). Caracterizació d'efectes sísmics locals a la Badia de Cadis. Microzonificació sísmica. (RISTE-COSTE).

SESAME European research project. (2004). Guidelines for the implementation of the /HV spectral ratio technique on ambient vibrations. Measurements, processing and interpretation. Deliverable: D23.12.

SESARRAY. (2010).

<http://www.geopsy.org/>

Sheila, A. Y. (2006). Microtremores. Compendio de trabajos de investigación CNDG-Biblioteca. Instituto Geofísico del Perú. V. 7. 43-56.

Tokimatsu, K., Midorikawa, S., Y. Yoshimi. (1989). Dynamic soil properties obtained from strong motion records, Proc. Twelfth Int. Conf. Soil Mechanics Foundation Eng. 3, 1015-2018.

---

**APÉNDICE 1.** Parámetros aplicados a cada registro durante su procesado

---





**Tabla 1.** Parámetros aplicados a cada registro durante su procesado. Los registros cuya casilla de valor de frecuencia fundamental del suelo se encuentran rellenas en color gris corresponden a los emplazamientos en lo que se observó una respuesta plana en la curva del cociente espectral H/V o donde el pico presentaba valores altos, ambas respuestas características de emplazamientos ubicados sobre roca o en áreas con poco espesor de sedimentos.

Nº registro	Archivo	Ganancia	Longitud (x)	Latitud (y)	Ventanas	STA	LTA	Min STA/LTA	MaxSTA/LTA	Frecuencia fundamental
LES										
1	153	1024	313702	4743677	40	2	40	0.2	2.5	2.0
2	154	2048	313968	4743893	40	2	40	0.2	2.5	2.4
3	155	1024	313592	4743590	40	2	40	0.3	2.5	1.7
4	156	1024	313429	4743440	40	2	40	0.2	2.5	2.1
5 C1	157	256	313091	4743485	40	2	60	0.2	2.5	2.4
5 C2	034	512	313136	4743425	40	2	40	0.2	2.5	3.3
6	158	512	313277	4743327	50	2	30	0.5	2	2.3
7	159	1024	313234	4743393	40	2	30	0.2	2.5	2.2
8	160	1024	313392	4743318	40	2	40	0.5	2.5	2.2
9	043	1024	313572	4743137	60	2	40	0.5	2.5	3.9
10	162	1024	313255	4743194	40	2	40	0.45	2	2.9
11	163	1024	313137	4742991	40	2	40	0.2	2.5	2.4
12	164	512	313069	4742800	40	2	40	0.2	2.5	2.4
13	165	512	313039	4742632	40	2	40	0.2	2.5	3.0
14	166	512	312922	4742439	40	2	40	0.5	2	4.1
15	168	512	312847	4742274	40	2	30	0.2	2.5	8.1
16	169	512	312734	4742157	40	2	40	0.2	2.5	5.5
17	170	512	312992	4742475	40	2	40	0.2	2.2	4.2
18	044	256	312853	4742487	40	2	40	0.3	2.5	2.3
19	172	512	312828	4742496	40	2	40	0.2	2.5	2.6
20	173	512	312770	4742513	40	2	40	0.2	2	2.4

21	174	512	312723	4742528	40	2	40	0.2	2.5	3.3
86	027	256	312670	4742157	50	2	40	0.3	2.5	4.9
87	028	256	312636	4742190	40	2	40	0.2	2.3	4.2
<b>BOSSOST</b>										
22	175	1024	311776	4739571	40	2	40	0.5	2	7.7
23	031	1024	311649	4739619	60	2	40	0.2	2	2.3
24 C1	177	512	311487	4739666	40	2	40	0.2	2.5	2.3
24 C2	177	512	311541	4739644	40	2	40	0.5	2	2.3
25	033	256	311391	4739645	60	2	40	0.2	2	1.6
26	179	1024	311333	4739677	40	2	40	0.5	2.5	2.6
27	180	1024	311224	4739683	40	2	40	0.2	2	4.8
28	181	512	311516	4740084	40	2	40	0.3	2.5	
29	182	1024	311432	4739994	40	2	40	0.2	2.2	3.6
30	183	1024	311365	4739907	40	2	40	0.4	2.5	4.3
31	184	1024	311306	4739778	40	3	30	0.4	2.5	5.3
32	185	1024	311241	4739702	40	2	40	0.2	2.1	4.8
33	186	1024	311215	4739528	40	2	40	0.2	2.2	2.7
34	187	512	311160	4739399	40	2	40	0.2	2.2	2.7
84	029	512	311534	4739696	70	2	40	0.2	2.5	2.3
85 C1	30	512	311521	4739751	70	2	40	0.5	2	2.3
85 C2	30	512	311576	4739733	40	2	40	0.4	2	2.1
<b>VIELHA</b>										
35 C1	188	512	319746	4731120	60	2	30	0.5	2	12.6
35 C2	188	512	319693	4731137	60	2	40	0.2	3	7.5
36	189	256	319638	4731157	40	2	40	0.2	2.5	7.4
37 C1	190	512	319470	4730740	50	2	40	0.2	2.5	4.1
37 C2	190	512	319531	4730733	40	3	30	0.5	2	4.3
38	192	1024	319615	4730672	60	2	50	0.5	2.5	4.7
39	193	1024	319572	4730549	60	2	40	0.1	3	3.4
40	194	1024	319509	4730489	40	2	40	0.3	2.2	2.8

41	195	1024	319465	4730431	40	2	40	0.3	2.2	3.1
42 C1	196	512	319425	4730110	50	2	40	0.5	2.5	
42 C2	196	512	319390	4730057	60	2	30	0.5	2.5	
43	197	512	319378	4730209	50	2	40	0.5	2	
44	198	1024	319435	4730220	60	2	60	0.5	2.5	4.8
45	199	1024	319382	4730194	50	2	60	0.2	2.5	
46	200	1024	319466	4730267	50	2	40	0.4	2	4.2
47	201	1024	319405	4730310	50	3	40	0.2	2.5	4.3
48	202	1024	319563	4730328	60	2	40	0.2	2	3.7
49	203	2048	319993	4730440	40	2	40	0.4	2.1	
50	204	2048	320163	4730312	60	2	40	0.2	2.5	
52	206	1024	319904	4730427	60	2	30	0.3	2.5	7.8
53	207	512	319907	4730369	40	2	20	0.2	3	6.1
54	208	512	320176	4730142	40	2	40	0.2	2.5	
55 C1	209	256	320096	4729982	30	3	40	0.2	2	7.8
55 C2	209	256	320107	4730042	30	2	60	0.2	2.5	8.7
56	210	512	320062	4729907	40	2	40	0.1	3	
57	211	512	319523	4731192	40	2.5	60	0.2	2.4	
58	212	512	319652	4730397	40	2.5	40	0.2	2	3.3
59	213	512	319750	4730506	30	3	60	0.2	2.5	7.3
60 C1	214	512	319796	4730241	40	2	40	0.2	2.5	3.7
60 C2	214	512	319769	4730217	40	2	40	0.2	2.5	4.2
61	215	512	319727	4730174	40	2	40	0.2	3	5.0
62 C1	216	512	319674	4730109	60	2	40	0.2	2	8.9
62 C2	216	512	319629	4730071	50	2	50	0.5	2	
63	217	1024	320250	4730072	50	2	40	0.2	2	
64 C1	218	512	320092	4730057	30	3	30	0.2	2	7.3
64 C2	218	512	320032	4730087	60	2	40	0.4	2.3	6.7
65 C1	219	512	319983	4730111	40	2	40	0.2	2.5	4.7
65 C2	219	512	319939	4730141	40	2	40	0.2	2.5	4.5

66 C1	220	512	319883	4730168	60	3	40	0.2	2.5	4.3
66 C2	220	512	319843	4730200	60	3	40	0.2	2.5	3.9
67 C1	221	512	319730	4730305	60	2	40	0.5	2.5	3.7
67 C2	221	512	319708	4730353	40	3	30	0.5	2	3.3
68	222	512	319299	4730454	40	2	40	0.4	2	3.2
69	223	256	319277	4730639	50	2	40	0.2	2.5	4.7
70	224	512	319240	4730742	30	2	50	0.1	2.8	4.1
71	003	512	319311	4730744	40	2	40	0.5	2	3.9
80	012	512	319598	4731382	40	3	30	0.2	2.5	7.3
81	013	256	319622	4731249	40	2	40	0.2	2.5	
82	014	256	319582	4731033	40	2	40	0.2	2.5	9.0
83	015	256	319577	4730911	40	3	40	0.2	2.5	8.5
ARTIES										
72	004	512	325833	4729390	60	2	40	0.5	2.5	7.0
73	005	1024	325721	4729527	50	2	30	0.2	2	6.6
74	006	1024	325757	4729670	40	2	40	0.2	2.5	2.8
75	007	1024	325771	4729731	40	1	30	0.2	2.5	2.8
76	008	1024	325799	4729831	40	2	40	0.4	2.3	2.8
77	009	1024	325828	4729908	50	2	60	0.2	2	2.8
78	010	1024	325860	4729968	60	2	30	0.2	3	2.8

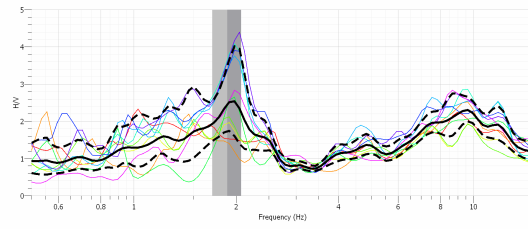
---

## **APÉNDICE 2.** Gráficas de cociente espectral H/V en función de la frecuencia

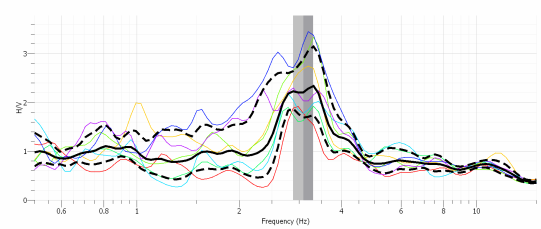
---



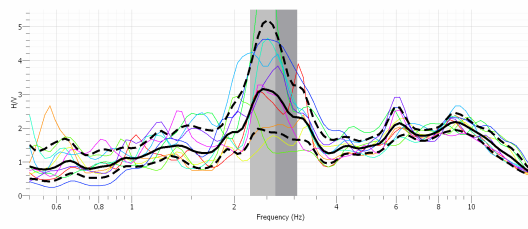
1



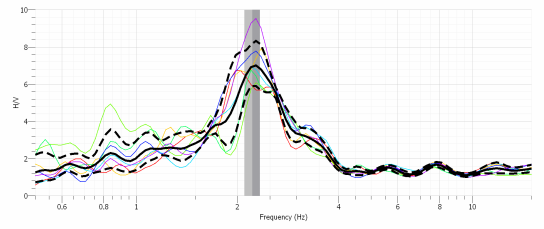
5 C2



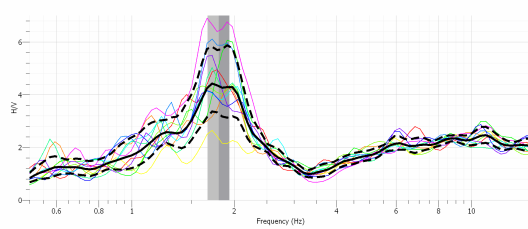
2



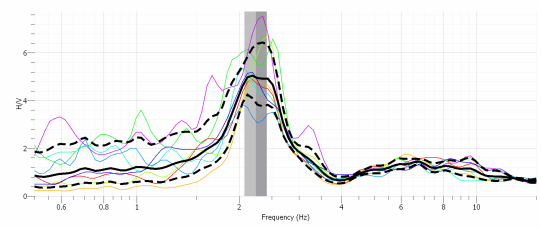
6



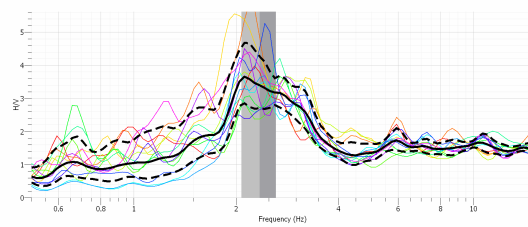
3



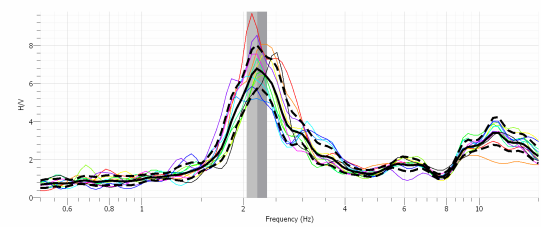
7



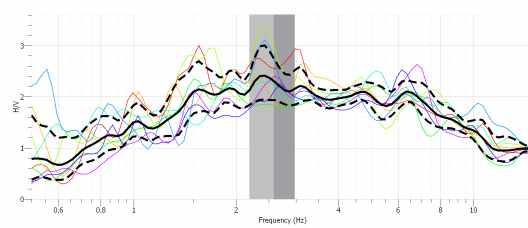
4



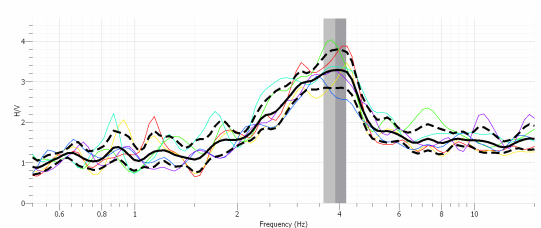
8



5 C1

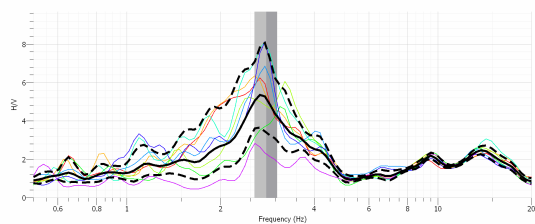


9

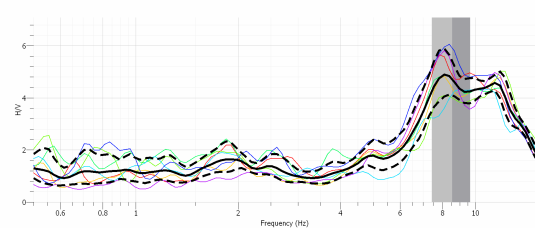




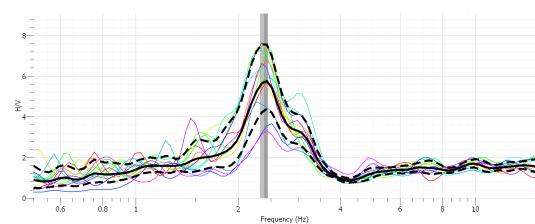
10



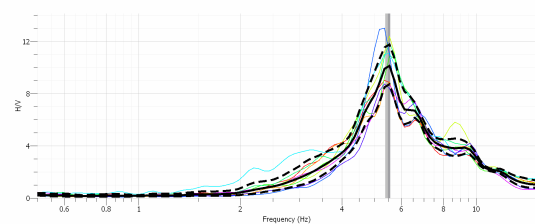
15



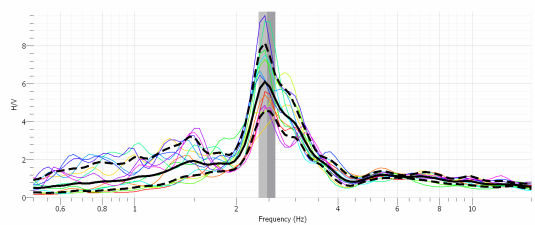
11



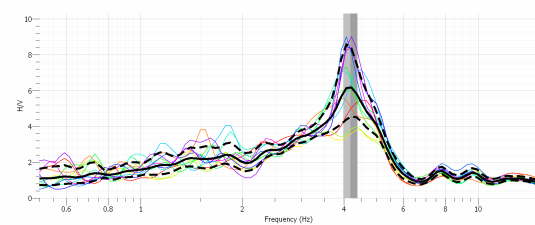
16



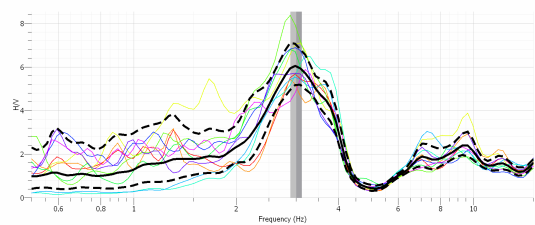
12



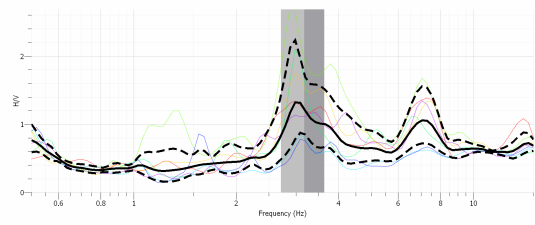
17



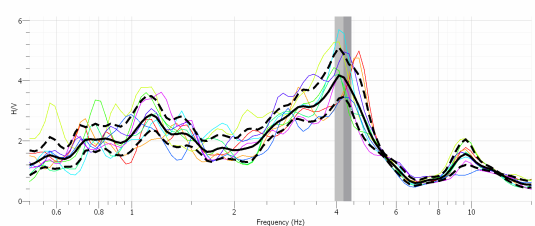
13



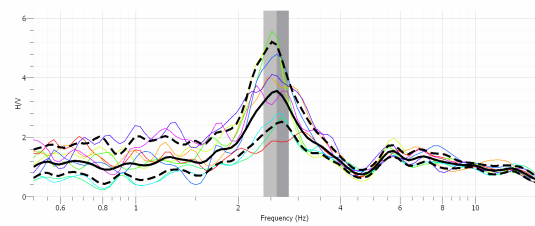
18



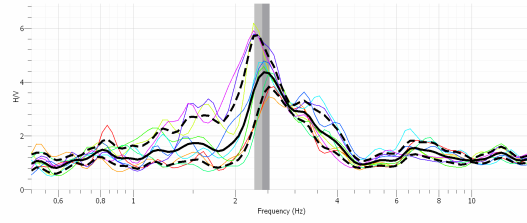
14



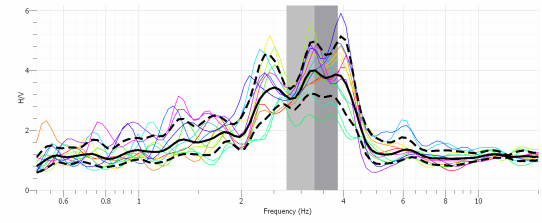
19



20

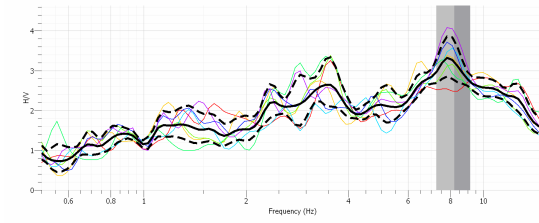


21

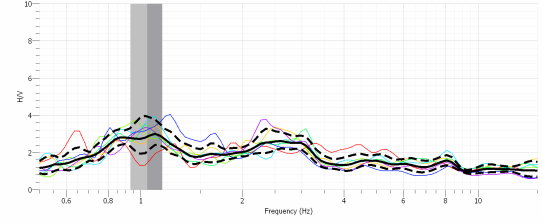


## BOSSOST

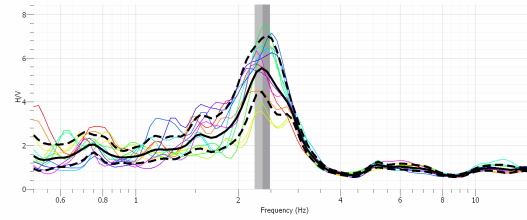
22



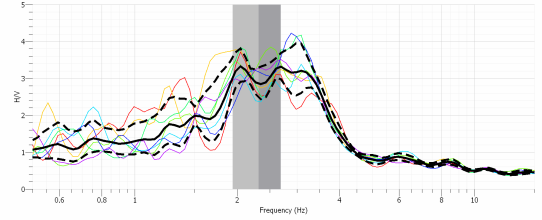
25



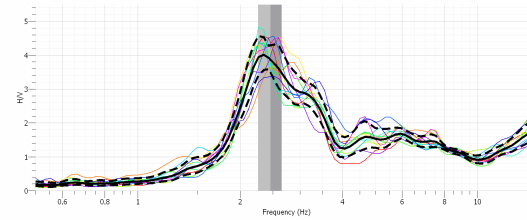
23



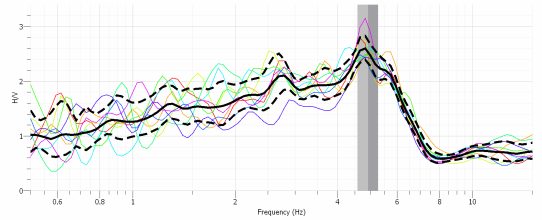
26



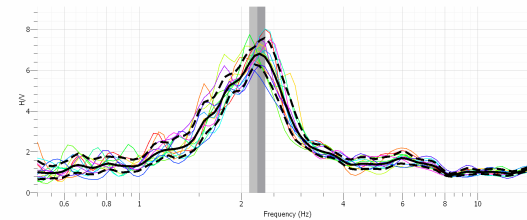
24 C1



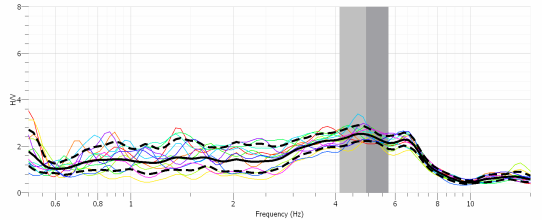
27



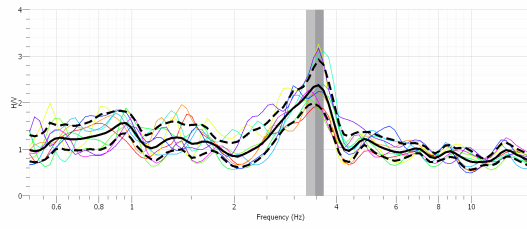
24 C2



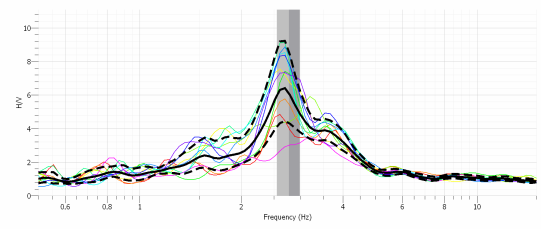
28



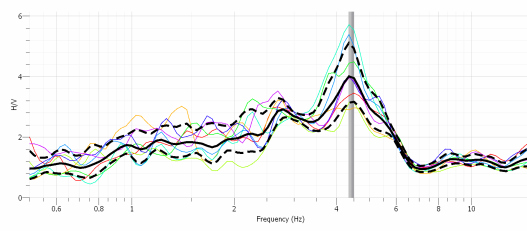
29



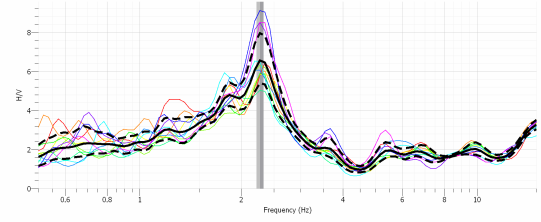
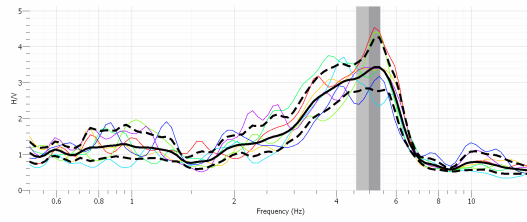
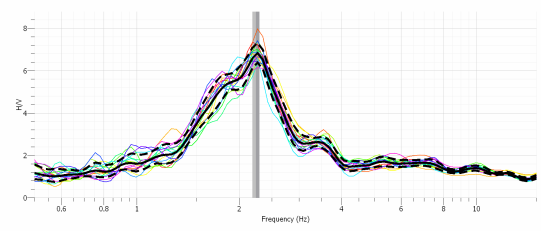
34



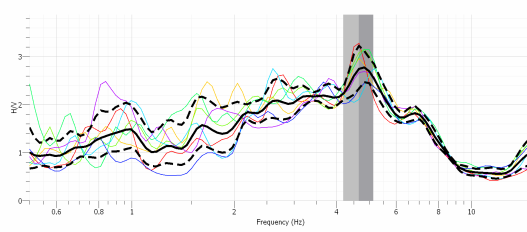
30



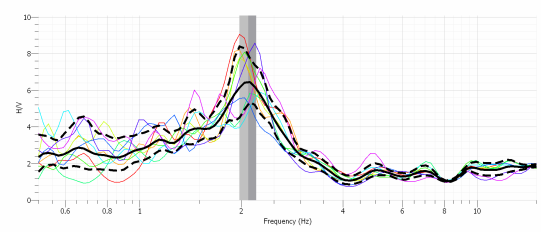
84



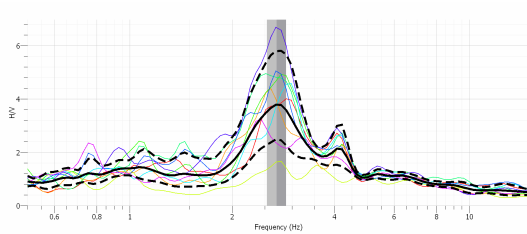
32



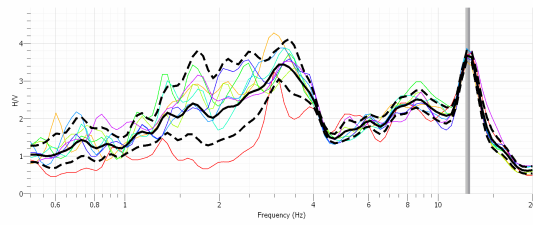
85 C2



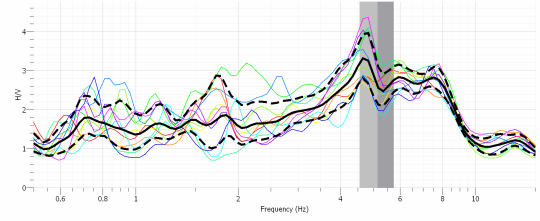
33



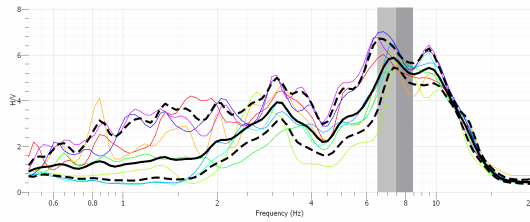
35 C1



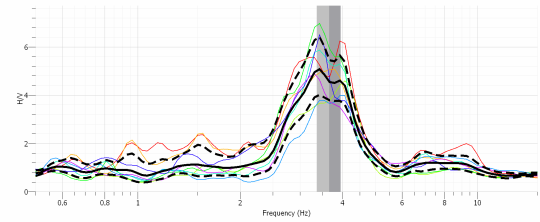
38



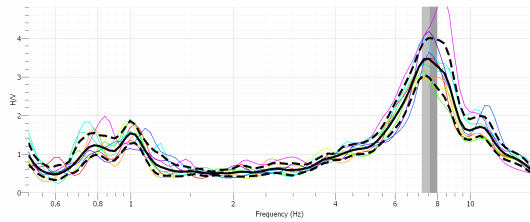
35 C2



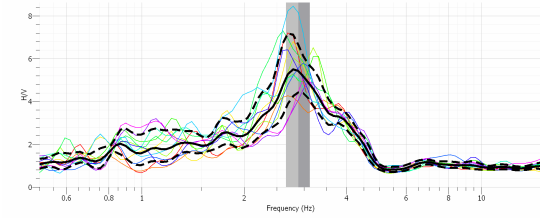
39



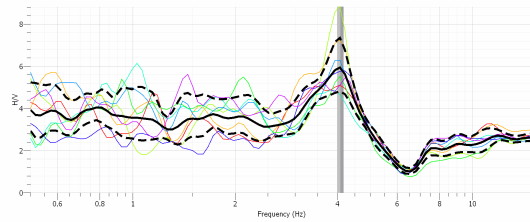
36



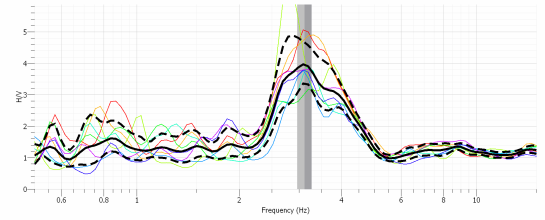
40



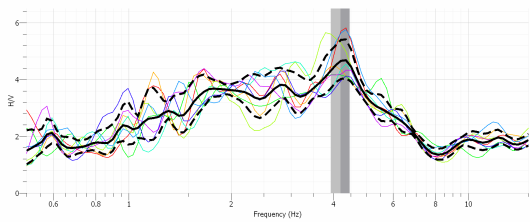
37 C1



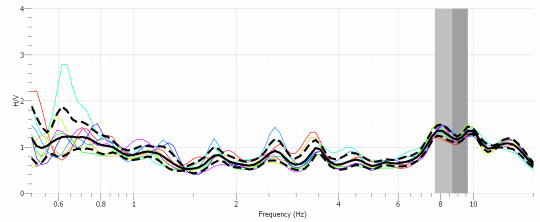
41



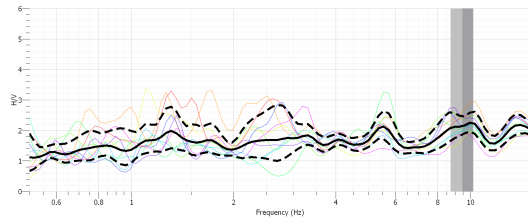
37 C2



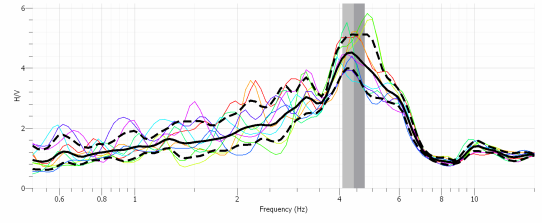
42 C1



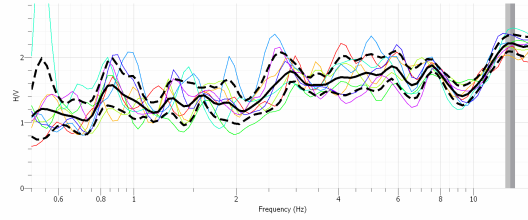
42 C2



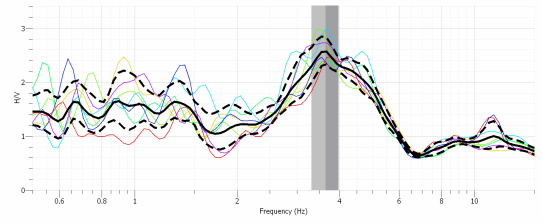
47



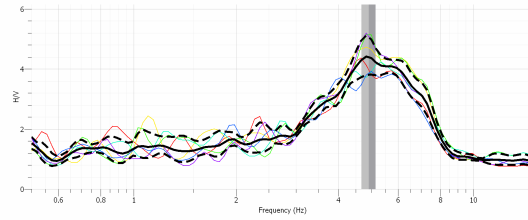
43



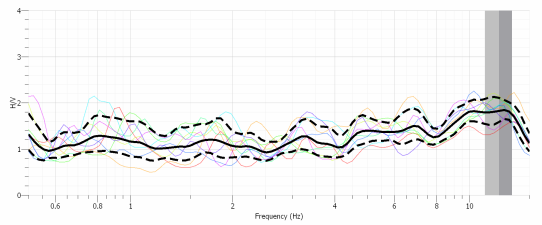
48



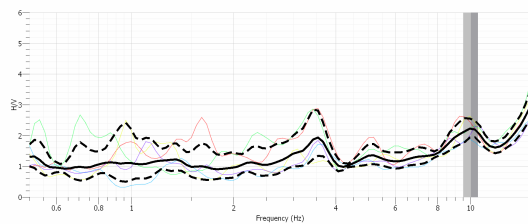
44



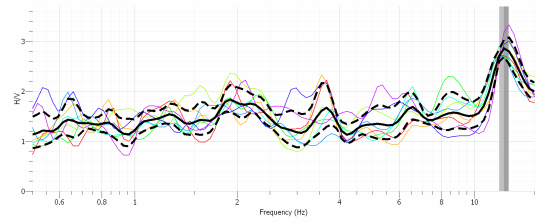
49



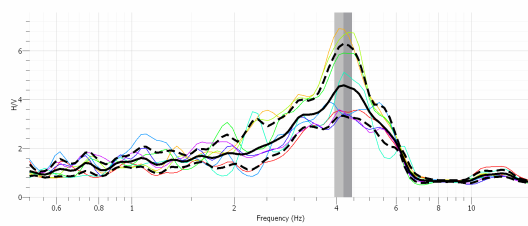
45



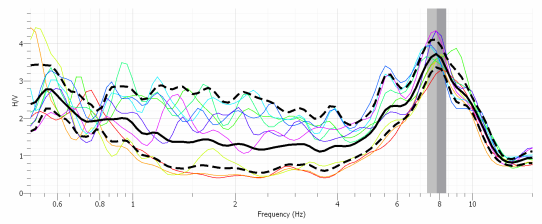
50



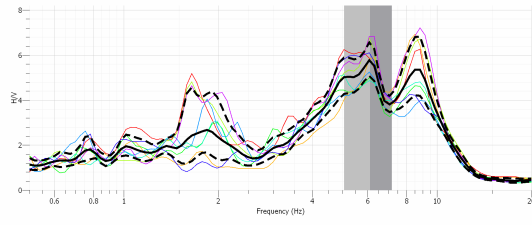
46



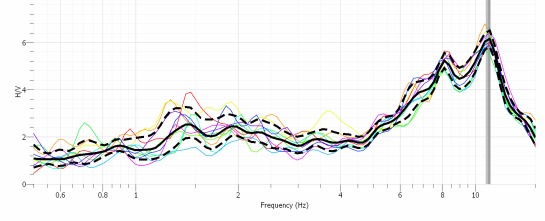
52



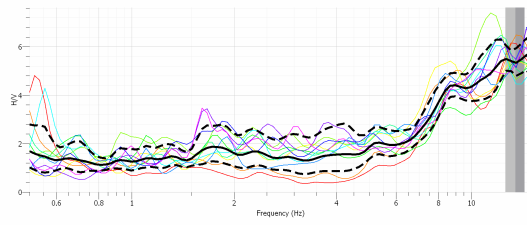
53



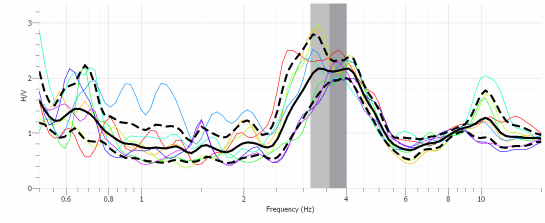
57



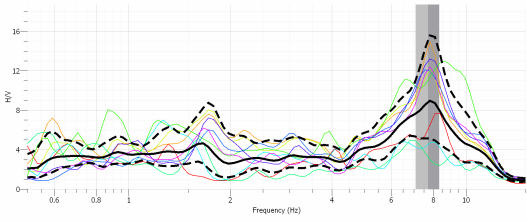
54



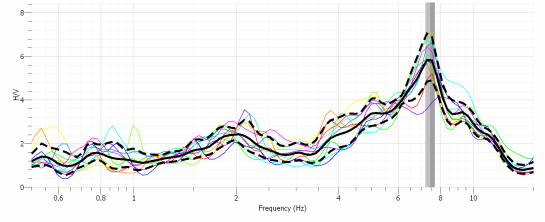
58



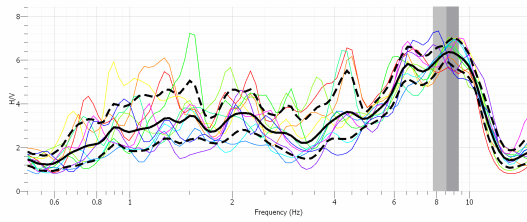
55 C1



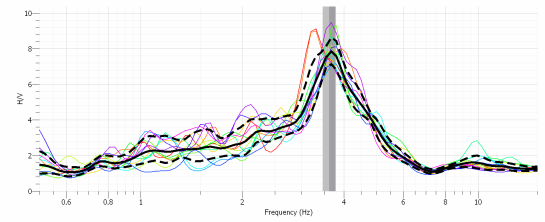
59



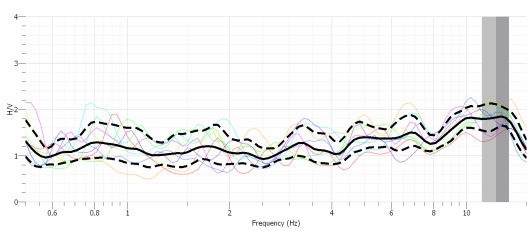
55 C2



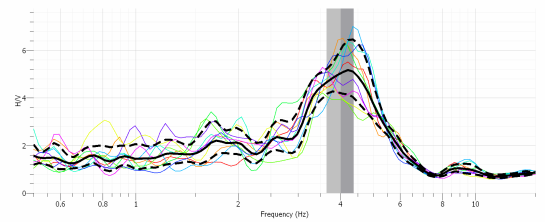
60 C1



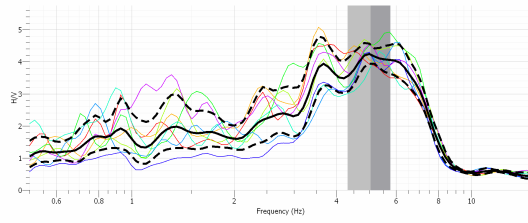
56



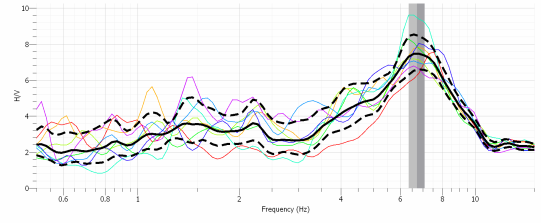
60 C2



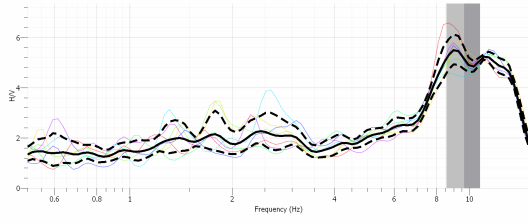
61



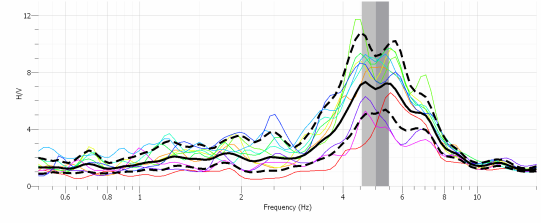
64 C2



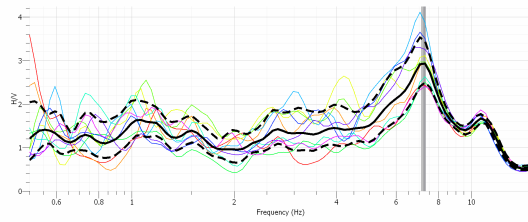
62 C1



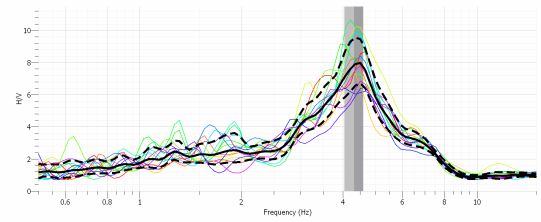
65 C1



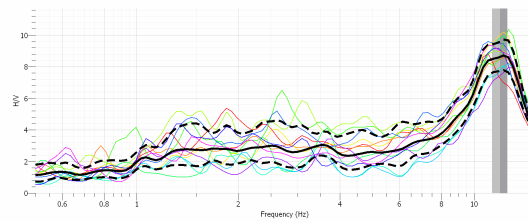
62 C2



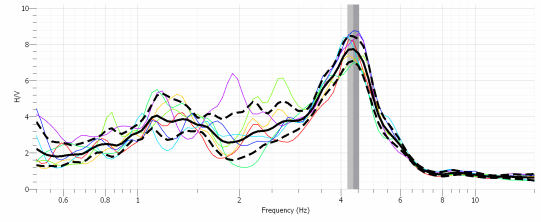
65 C2



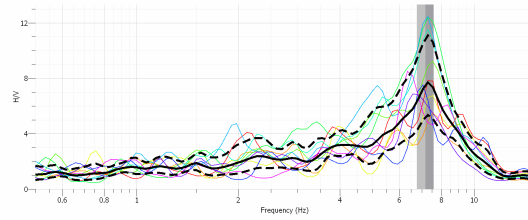
63



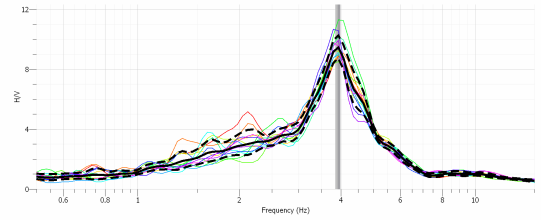
66 C1



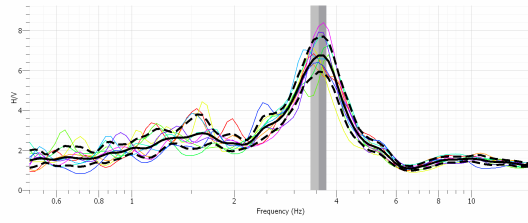
64 C1



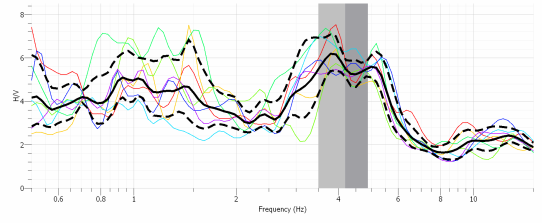
66 C2



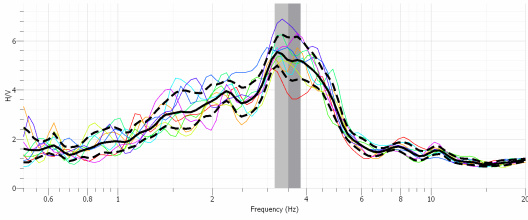
67 C1



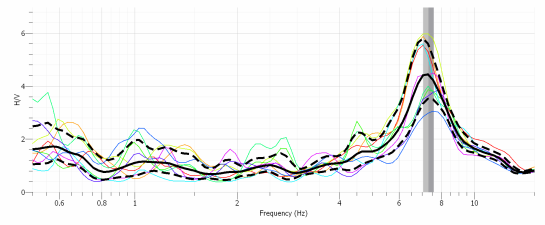
71



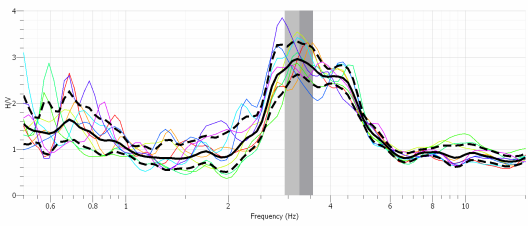
67 C2



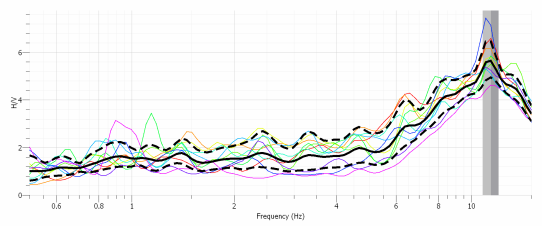
80



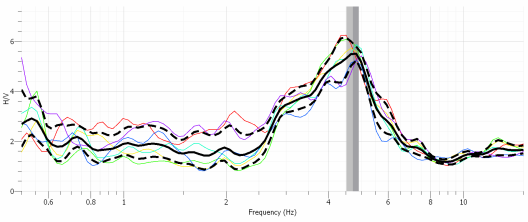
68



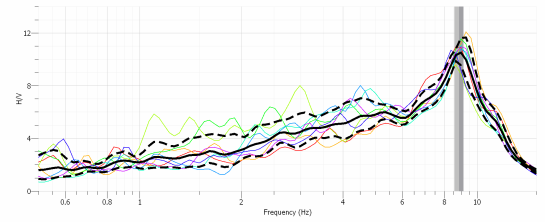
81



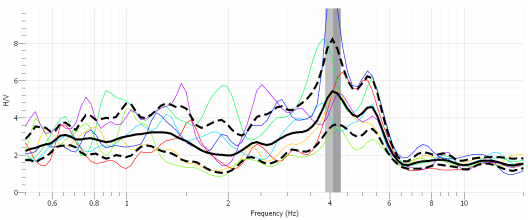
69



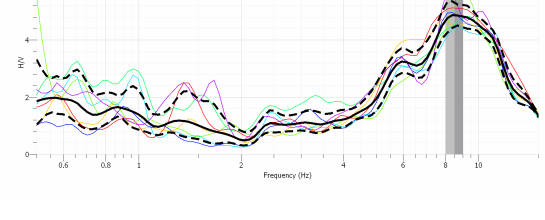
82



70

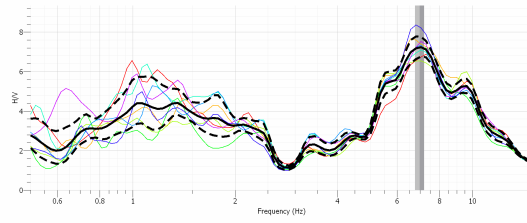


7

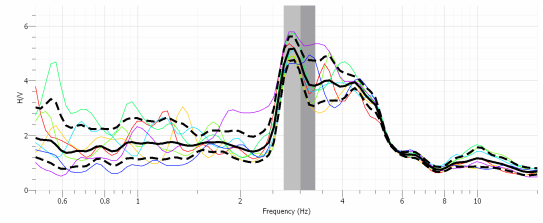




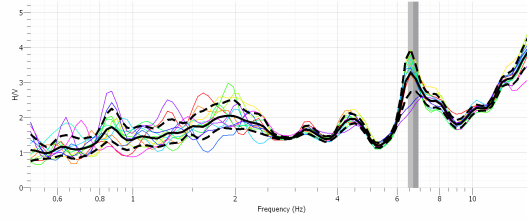
72



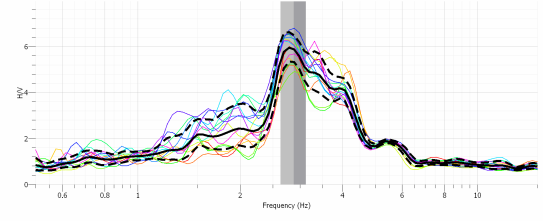
76



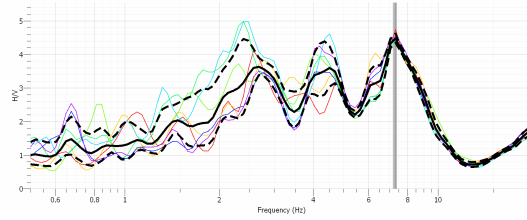
73



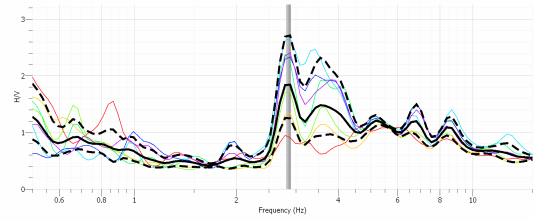
77



74



78



75

